

Vernetzte, wertstromorientierte Produktionssteuerung

Für die Auftragsfertigung komplexer
Teile aus Sinterwerkstoffen

D I S S E R T A T I O N

zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

vorgelegt von

Florian Arztberger

aus Selb

**Eingereicht bei der
Fakultät für Mathematik/Informatik und Maschinenbau
der Technischen Universität Clausthal**

Vorsitzender der Prüfungskommission:

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Alfred Weber

Hauptberichterstatter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Bracht

Mitberichterstatter :

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Nyhuis, Universität Hannover

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Turek

Tag der mündlichen Prüfung: 31.10.2016

Das vorliegende Buch ist die inhaltlich unveränderte Wiedergabe der Dissertation, die der Fakultät für Mathematik / Informatik und Maschinenbau der Technischen Universität Clausthal in der Sitzung vom 29. April 2016 zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs von Florian Arzberger vorgelegt wurde.

Vorwort des Herausgebers

Nur die erfolgreiche Gestaltung und Weiterentwicklung industrieller Wertschöpfung kann auf Dauer unseren Lebensstandard und die Errungenschaften der sozialen Marktwirtschaft absichern. Die Produktion bildet nach wie vor das Rückgrat einer modernen, im globalen Wettbewerb stehenden Industrie-, Dienstleistungs- und Informationsgesellschaft. Umfassendes Wissen und stetig neue Erkenntnisse auf den Gebieten der Fabrikplanung und Produktionsorganisation sind existentiell notwendig.

Die unternehmerische Bedeutung der Produktionsplanung ist im gleichen Maße gestiegen, wie sich die Innovationszyklen von Produkten, Fertigungs- und Logistiksystemen sowie der Arbeitsorganisation verkürzt haben. Um die vorhandene Marktposition zu festigen oder um Wettbewerbsvorteile zu erlangen, muss jede Unternehmensleitung neben dem Produkt und der Technologie auch die Produktionsstrukturen ständig analysieren, sie rechtzeitig an die zu erwartenden Marktentwicklungen anpassen und gegebenenfalls erneuern.

Die erhöhten Ansprüche an die Gestaltung und Wandlungsfähigkeit von Produktionsstrukturen im turbulenten Umfeld erfordern ein effizientes Projektmanagement und eine durchgehende rechnergestützte Planungsunterstützung. In der vorliegenden Reihe – Innovationen der Fabrikplanung und -organisation – sollen neue Methoden und Instrumente zur Planung und Optimierung von Produktionssystemen und -abläufen einer breiten Leserschaft in verständlicher Form vorgestellt werden. Es sind Forschungsergebnisse die häufig in enger Zusammenarbeit mit der Industrie am Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit der Technischen Universität Clausthal im Bereich Anlagenprojektierung und Materialflusslogistik entstanden sind.

Ein gemeinsamer systemtechnischer Ansatz kennzeichnet die Fachgebiete Anlagenplanung und Logistik, deren technische, informationstechnische, organisatorische und wirtschaftliche Fragestellungen ganzheitlich und zukunftsweisend zu beantworten sind. Die angestrebten Lösungsstrategien sind im Rahmen des gesamten Produkt- und Produktionse Entstehungsprozesses zu sehen und beinhalten sowohl eine theoretische, planerische und simulierende Seite als auch die konkrete Ausgestaltung von Prozessketten, Organisationsformen und Abläufen.

In der Vergangenheit wurden Produktionsstrategien, Programme und Teilebedarfe nicht selten aufgrund persönlicher Einschätzung und Erfahrung festgelegt. Heute sind mit Hilfe mathematischer, wissensbasierter Modelle hinreichende Prognosen und Szenarien zu entwickeln und das Komplexitätsmanagement muss bereits bei der Entwicklung variantenreicher Serienprodukte einsetzen. So können z.B. Agentensysteme schon vorausschauend bei der Analyse von Verbindungen möglicher Module helfen.

Früher wurden die darauf aufbauenden Produktionsstrukturen in der Regel nur statisch geplant und für dynamische Betrachtungen allenfalls Mittelwerte herangezogen. Um in Zukunft falsche oder überhöhte Investitionen und unnötige Folgekosten zu vermeiden, sind bestehende und zu planende Anlagen umfassend dynamisch zu analysieren und optimieren. Mit dem inzwischen zur Realität gewordenen ganzheitlichen Ansatz der Digitalen Fabrik kann jetzt – auf Basis eines umfassenden integrierten Datenmanagements durch rechnergestützte Einzelmethoden bis hin zur Virtuellen Realität - der Planungsprozess entscheidend beschleunigt und verbessert sowie die Planungsqualität und -sicherheit erheblich erhöht werden.

Nicht zuletzt gilt es, die in den Produktions- und Logistiksystemen arbeitenden Menschen wieder stärker in den Mittelpunkt zu stellen, ihre Bedürfnisse zu respektieren und ihnen genügend Raum für Engagement und Verantwortung mit effizienten Formen der Arbeitsorganisation zu geben, die Verschwendung vermeiden und eine stetige Steigerung des Produktionsflusses ermöglichen.

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand berufsbegleitend am Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit (IMAP) der Fakultät Maschinenbau an der Technischen Universität Clausthal. Während meiner Promotionszeit war ich innerhalb der Division „Ceramics“ des H.C. Starck Konzerns im Bereich der Produktionssystematik und Fertigungstechnik tätig.

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Uwe Bracht, Institutsdirektor der Abteilung Anlagenprojektierung und Materialflusslogistik des IMAP, gilt mein besonderer Dank für seine wissenschaftliche Unterstützung, seine Förderung und den fachlichen Rat, mit dem er diese Arbeit ermöglicht und begleitet hat.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Nyhuis, Institut für Fabrikanlagen und Logistik der Universität Hannover, und Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Turek vom ICVT der TU Clausthal danke ich für die Übernahme der Koreferate und die anregende Diskussion.

Herrn Dr.-Ing. Frank Schulenburg danke ich von ganzen Herzen für die jahrelange intensive Betreuung meiner Arbeit, die stundenlangen Gespräche und seine wertvolle Fachexpertise, die diese Arbeit bereichert hat. Mit seiner motivierenden und fördernden Art hat er die Herausforderung einer Promotion in mir geweckt und mir diesen Weg als Betreuer innerhalb des Unternehmens geebnet.

Weiterhin möchte ich Herrn Dr.-Ing. Carsten Russner für die Befürwortung und Unterstützung dieser Arbeit danken. Mit seiner eigenen berufsbegleitenden Promotion war er mir stets Vorbild und Motivation, diese Arbeit zu beenden. Für die vielen Fachdiskussionen, die offene und kollegiale Zusammenarbeit, und die stetige Bereitschaft und Neugier, neue Ideen zu diskutieren und Konzepte dieser Arbeit mit hoher Energie umzusetzen, danke ich dem beteiligten Team aus der Produktion von H.C. Starck.

Abschließend möchte ich mich herzlich bei meinen Eltern Elke und Bernhard Arzberger bedanken, die durch die Förderung meiner Ausbildung die Grundlage für diese Arbeit gelegt haben. Besonderer Dank gilt meiner Schwester Dipl.-Ing. Carolin Arzberger und meiner Frau Bianca für die eifrige Durchsicht des Manuskriptes, so manche wertvolle Anregung und die entgegengebrachte Unterstützung.

Clausthal, im November 2016

Florian Arzberger

Kurzfassung

Die heutigen Herausforderungen einer modernen Produktion sind gekoppelt an eine hohe Effizienz und Geschwindigkeit. Dies führt insbesondere bei kleinen verfahrenstechnisch spezialisierten Unternehmen zu beträchtlichen Auswirkungen, um die dabei auftretende Steuerungskomplexität zu beherrschen. Die vorliegende Arbeit begegnet dem mit einem neuartigen Steuerungsmodell, das die Wirkzusammenhänge der wertstromorientierten Steuerung der komplexen heterogenen Auftragsfertigung von Sinterbauteilen ganzheitlich betrachtet und entsprechende Lösungen erarbeitet.

Den vorherrschenden zentralen Steuerungssystemen fehlt es häufig an Prägnanz und Aktualität in den Steuerungsinformationen, welches oft zu hoher Intransparenz in der Planung führt, die dann meist durch intensive Steuerungsaktivitäten ausgeglichen werden muss. Trotz einer hohen Komplexität des Produktionsprogramms und kurzem Planungshorizont in einer aufwendig verfahrenstechnisch verketteten Werkstattfertigung, zeigt diese Arbeit, dass die Prinzipien der Pull- und Flussorientierung auch auf diese industriespezifische Auftragsfertigung in angepasster Form anwendbar sind. Dazu werden die Methoden der Entkopplung und Synchronisierung, sowie moderne Kommunikations- und IT-Werkzeuge, die heute meist in der Serienproduktion verbreitet sind, in Form eines ganzheitlichen Modellansatzes mit der komplexen Produktion von Sinterbauteilen in Verbindung gebracht und beispielhaft dargestellt.

Ein neuartiges hybrides Steuerungsmodell, das dem Konfigurationsansatz der prozessorientierten Modularisierung folgt, funktionsorientierte Konzeptelemente und abgeleitete Formen der Implementierung sind die zentralen Ergebnisse dieser Konzeption. Die mehrstufige Produktion wird gezielt bereichsspezifisch optimiert und wertstromorientiert vernetzt in die Steuerung integriert. Module nehmen dazu adaptierte Funktionalitäten wahr, wodurch die Prozesskette am Anfang gezielt synchronisiert, durch die verfahrenstechnische Chargenproduktion flexibel getaktet und am Ende durch eine flussorientierte Werkstattproduktion in ein übergeordnetes Pull-System überführt wird. Eine Übertragung der Module in die reale betriebliche Praxis belegt bereits, anhand signifikanter Verkürzungen der Durchlauf- und Wartezeiten sowie verbesserter Auslastung, erhebliche Stabilisierungseffekte in der Prozesskette und die hohe Effizienz und Geschwindigkeit dieses Lösungsansatzes. Durch dezentrale Modul- und zentrale Schnittstellensteuerung in einer ganzheitlichen Betrachtung mit gezielter Digitalisierung von Produktionsabläufen leistet diese Arbeit einen wesentlichen Beitrag zu einer vernetzten, wertstromorientierten Produktionssteuerung. Weiterer Handlungsbedarf leitet sich daraus z. B. für eine tiefgreifende Integration von Produktionsplanung und -steuerung ab.

Abstract

Today's challenges of a modern production are coupled with high efficiency and pace. This leads to considerable effects especially in small process and engineering oriented companies in order to cope with the resulting complexity in control. This thesis deals with this developing a novel control model which holistically considers the effects of the value-stream-oriented control of the complex heterogeneous production of sintered components and develops corresponding solutions.

The prevailing central control systems often lack the importance of conciseness and timeliness in the control information which often leads to a low degree of transparency in planning which must then usually be compensated by intensive control activities. Despite the high complexity of the production program and the short planning horizon in an complex process-chained workshop production this thesis demonstrates that the principles of pull and flow orientation can also be applied to this industry-specific order production in an adapted form. To this end the methods of decoupling and synchronizing as well as modern communication and IT tools which are now widely used in series production are presented in a holistic model approach.

A novel hybrid control model that follows the configuration approach of process-oriented modularization, function-oriented concepts, and derived forms of implementation are the central results of this concept. The multi-stage production is specifically optimized in a range-specific manner and integrated into the control network in a particular manner. Modules take on adapted functionalities whereby the process chain is initially synchronized, flexibly clocked by the process-technical batch production and finally transferred to a higher-level pull system by a flow-oriented workshop production.

The transfer of the modules into the real operational practice already demonstrates significant stabilization effects in the process chain as well as the high efficiency and speed of this solution approach due to significant shortening of the throughput and waiting times as well as improved utilization. Decentralized module and central interface control in a holistic view with targeted digitization of production processes make a significant contribution to a networked, value-oriented production control. Further need for action is derived for example, from a profound integration of production planning and control.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract	II
Inhaltsverzeichnis.....	III
Abbildungsverzeichnis.....	VI
Formelverzeichnis	IX
Abkürzungsverzeichnis.....	X
1 Einleitung	1
1.1 Problematik.....	2
1.2 Motivation und Zielsetzung	5
1.3 Aufbau und Vorgehensweise	7
2 Ausgangssituation und Gestaltungsbereich.....	10
2.1 Rahmenbedingungen der variantenreichen Produktion von Sinterbauteilen	10
2.1.1 Marktanforderungen und Entwicklungstendenzen	11
2.1.2 Spezifische Produktions- und Verfahrenstechnik.....	15
2.1.3 Personal	19
2.1.4 Organisationsform der Einzelteil- und Kleinserienfertigung	21
2.2 Ausgangssituation in der Produktionssteuerung.....	27
2.2.1 Herausforderungen der Auftragsabwicklung.....	27
2.2.2 Turbulenzen im Wertstrom	30
2.2.3 Defizite der Fertigungssteuerung.....	33
2.3 Eingrenzung des Gestaltungsbereiches	35
3 Stand der Technik wertstromorientierter Produktionssteuerung	37
3.1 Ziele und Aufgaben.....	37
3.1.1 Logistisches Zielsystem.....	37
3.1.2 Einordnung der Aufgaben.....	39
3.2 Prinzipien der Produktionssteuerung	41
3.2.1 Pull- oder Push-Prinzip	42
3.2.2 Organisationsprinzip	43
3.2.3 Flussorientierung	44
3.3 Verfahren wertstromorientierter Produktionssteuerung	45
3.3.1 Übersicht konventioneller Verfahren.....	46
3.3.2 Wertstromorientierte Ansätze	51

3.3.3 Aktuelle adaptive Ansätze	53
3.3.4 Ansätze und Methoden zur Konfiguration	56
3.4 Information und Kommunikation	59
3.4.1 IT-Systeme	59
3.4.2 IT-Integration der Prozesse	60
3.4.3 Kommunikation	62
3.5 Integration im ganzheitlichen Produktionssystem	63
3.6 Abgeleiteter Handlungsbedarf	66
4 Konzeptentwicklung des Steuerungsmodells.....	68
4.1 Anforderungen an das Steuerungsmodell	68
4.2 Phasen der Modellentwicklung	69
4.2.1 Begriffe	70
4.2.2 Phasenkonzept	70
4.2.3 Auslegungsrahmenstruktur	71
4.2.4 Umfeldanalyse	73
4.3 Modellentwicklung	76
4.3.1 Ansatz und Vorgehensweise	77
4.3.2 Steuerungsmodell	79
4.3.3 Konzeptelemente	83
4.4 Detaillierung des Steuerungsmodells	85
4.4.1 Konzept der funktionsorientierten Inselproduktion	86
4.4.2 Konzept zur Integration verfahrenstechnischer Parameter	90
4.4.3 Konzept der flussorientierten Werkstattfeinsteuerung	95
4.4.4 Konzept zur IT-Integration und Kommunikation	99
4.4.5 Vernetzungskonzept	102
4.5 Zwischenfazit: Vernetzte, wertstromorientierte Produktionssteuerung	105
5 Anwendung des Modells und Umsetzung idealer Prozessstrukturen	107
5.1 Vorgehensweise der Umsetzung	107
5.2 Beispiel zur flussorientierten Werkstattfeinsteuerung	109
5.2.1 Prozessstrukturen in der Organisation	109
5.2.2 Prozessstrukturen in der Information und Kommunikation	114
5.3 Beispiel zur funktionsorientierten Inselproduktion	116
5.4 Beispiel zur Integration verfahrenstechnischer Parameter	121
6 Kritische Bewertung und Erfahrungen der Umsetzung	125
6.1 Interpretation der Ergebnisse	125
6.1.1 Ergebnisse im Modul Hartbearbeitung	125
6.1.2 Ergebnisse im Modul Grünbearbeitung	128
6.1.3 Leistungsfähigkeit im Modul Sintern	131

6.2	Auswirkungen auf das Steuerungsmodell.....	132
6.2.1	Zusammenfassende Bewertung	132
6.2.2	Bewertung des Umsetzungsgrades	132
6.2.3	Kritische Bewertung der Vorgehensweise	133
6.3	Spezifische Erkenntnisse und Erfahrungen der Umsetzung	135
7	Weiterführende Potentiale und Ausblick.....	137
7.1	Weiterentwicklung des Steuerungsmodells	137
7.2	Übertragbarkeit der vernetzten, wertstromorientierten Produktionssteuerung	138
7.3	Praxisbezogene Potentiale durch die Umsetzung	139
8	Zusammenfassung	141
	Literaturverzeichnis.....	144
	Anhang A: Vertiefung der Grundlagen	158
A1:	Werkstoffeigenschaften	158
A2:	Materialflusskomplexität	158
A2:	Logistische Zielgrößen	159
A3:	Auftragsabwicklungsprozess	159
	Anhang B: Analytische Untersuchungen	160
B.1	Wertstromanalyse.....	160
B.2	Analysebeispiele der Umfeldanalyse.....	161
	Anhang C: Beispiele der Visualisierung	162
	Anhang D: Ablaufstruktur im Modul Sintern	165
	Anhang D: Weitere Umsetzungsbeispiele	166
	Lebenslauf	167

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Gegenüberstellung von Produktionsstrategien (vgl. Pawellek [PAW14, S. 6]).....	2
Abbildung 1-2: Einflussfaktoren für die Auswahl des logistischen Leitbilds (in Anlehnung an WIENDAHL [WIE02]).....	4
Abbildung 1-3: Wesentliche Bausteine und Aufbau der Arbeit.....	8
Abbildung 2-1: Überblick über Einflüsse auf die Organisationsform der Produktion (in Anlehnung an [FUC13]).....	10
Abbildung 2-2: Technisches Marktumfeld dieser Arbeit (erweitert aus [ARZ14])	12
Abbildung 2-3: Überblick der Produkt- und Materialvielfalt im Betrachtungsbereich [HC 14]	14
Abbildung 2-4: Prozesskette der Herstellung komplexer Teile aus Sinterwerkstoffen	15
Abbildung 2-5: Charakterisierung des betrachteten Produktionsprogramms [BRA15].....	19
Abbildung 2-6: Vergleich der Fertigungsarten [LÖD08b]	21
Abbildung 2-7: Organisationsschema unterschiedlicher Fertigungsprinzipien (in Anlehnung an [EVE97]).....	22
Abbildung 2-8: Ausgangssituation der Organisation nach dem Verrichtungsprinzip im betrachteten Beispielunternehmen.....	24
Abbildung 2-9: Beispiel der Kapazitätsbedarfsschwankung eines Jahres	25
Abbildung 2-10: Modell der Produktionssteuerung nach LÖDDING [LÖD08b].....	28
Abbildung 2-11: Aufgaben der Produktionssteuerung [WIE14b] und deren Herausforderung	29
Abbildung 2-12: Qualitative Visualisierung des Wertstroms im Ausgangszustand	31
Abbildung 2-13: Charakterisierung der Engpässe, Durchlaufzeiten und Prozessnivellierung	32
Abbildung 2-14: Symptomgetriebener Fehlerkreis in der Produktionssteuerung [WIE12, S. 12]	34
Abbildung 2-15: Gestaltungsebenen der Modellierung	36
Abbildung 3-1: Ausrichtung des logistischen Zielsystems (in Anlehnung an [MUS13])	38
Abbildung 3-2: Idealisierte Produktionskennlinien (vgl. [NYH12])	39
Abbildung 3-3: Aufgabensicht des Aachener PPS-Modells [LUC01]	40
Abbildung 3-4: Aufgabenebenen und Phasen der Produktionssteuerung (entwickelt aus [SCH12b]; [BOO15]; [MÜT09])	41
Abbildung 3-5: Logik des Pull- und Push-Prinzips (entwickelt aus [GRI12] zitiert nach [WIE99])	42
Abbildung 3-6: Logik der Fluss- und Turbulenzorientierung im Vergleich [WIE02]	45
Abbildung 3-7: Konzept der „Wertstromorientierten Produktionssteuerung“ [SCH10]	52

Abbildung 3-8: Steuerungsorientierte Produktionsmodularisierung in Werkstatt- und Serienfertigung [ENG15]	54
Abbildung 3-9: Konfiguration der Fertigungssteuerung (vgl. [NYH10b, GRI12] zitiert nach [LÖD08a])	57
Abbildung 3-10: Iterative Vorgehensweise zur Zielerreichung der Konfiguration [MÜT09].....	58
Abbildung 3-11: Einordnung der MES-Ebene im Unternehmen (in Anlehnung an [KRE15]; [VDI07])	60
Abbildung 3-12: Alternative Lösungsansätze zur Prozessintegration von ERP und MES [WOC14]	61
Abbildung 3-13: Funktionsgliederung unter Gesichtspunkten der Kommunikation (entwickelt aus [WES13]; [KLE14]).....	62
Abbildung 3-14: Gestaltungsprinzipien ganzheitlicher Produktionssysteme [DOM15]	64
Abbildung 4-1: Anforderungen aus der Analysephase	69
Abbildung 4-2: Phasenkonzept	71
Abbildung 4-3: Auslegungsrahmenstruktur	72
Abbildung 4-4: Struktur der Umfeldanalyse	74
Abbildung 4-5: Analysebeispiel	75
Abbildung 4-6: Vorgehensweise der Modellbildung innerhalb des Phasenkonzeptes	78
Abbildung 4-7: Strukturiertes Vorgehen zur Formulierung des Lösungsansatzes	80
Abbildung 4-8: Steuerungsmodell	82
Abbildung 4-9: Phase der Detaillierung und Adaption des Steuerungsmodells	85
Abbildung 4-10: Konzept der funktionsorientierten Inselproduktion	88
Abbildung 4-11: Schematische Darstellung der dezentralen Feinsteuerung.....	89
Abbildung 4-12: Signaldiagramm der Wertschöpfung eines repräsentativen Auftrages	91
Abbildung 4-13: Verfahrens- und Dispositions-Kriterien der Blockbildung	92
Abbildung 4-14: Vereinfachtes Beispiel zur Bildung von Auftrags-Paketen	94
Abbildung 4-15: Konzept der flussorientierten Werkstattfeinsteuerung	96
Abbildung 4-16: Wirk- und Steuerungsmechanismen der Gestaltungsfelder.....	98
Abbildung 4-17: IT-Anbindung der Module	100
Abbildung 4-18: Detaillierung des Vernetzungskonzeptes.....	103
Abbildung 4-19: Durchlaufdiagramm im Auftragspuffer „Sintern-Hartbearbeitung“ (in Anlehnung an [NYH12])	104
Abbildung 4-20: Qualitative Auswirkungen des Steuerungsmodells (vgl. 3.2.1)	105
Abbildung 5-1: Anwendung des Steuerungsmodells in der Gestaltungsphase	107
Abbildung 5-2: Umsetzungsmaßnahmen der „flussorientierten Werkstattfeinsteuerung“	109
Abbildung 5-3: Beispiel der Umsetzung der "flussorientierten Werkstattfeinsteuerung" im Layout.....	110

Abbildung 5-4: Beispiel der Umsetzung der Feinsteuerung mithilfe des „Single-Trolley-Flow“	112
Abbildung 5-5: Beispiel der ganzheitlichen Logistikprozesse in der Werkstattsteuerung.	113
Abbildung 5-6: Beispiel der IT-Integration in die flussorientierte Werkstattfeinsteuerung	114
Abbildung 5-7: Umsetzungsmaßnahmen der „funktionsorientierten Inselproduktion“	117
Abbildung 5-8: Beispiel Layout der „funktionsorientierten Inselproduktion“	118
Abbildung 5-9: Umsetzungsbeispiele im Modul Grünbearbeitung	119
Abbildung 5-10: Beispiel der Materialflusslogistik im Modul Sintern	121
Abbildung 5-11: Vereinfachtes Beispiel - Blockbildung im MES-System	123
Abbildung 5-12: Auswertebeispiel zur Digitalisierung der Verfahrenstechnik	124
Abbildung 6-1: Entwicklung der logistischen Kennzahlen im Modul Hartbearbeitung	126
Abbildung 6-2: Entwicklung der mittleren Leistung A_m einer Maschinengruppe im Modul Hartbearbeitung	127
Abbildung 6-3: Entwicklung der logistischen Kennzahlen im Modul Grünbearbeitung	129
Abbildung 6-4: Mittlere Auslastung A_m im Modul Grünbearbeitung	129
Abbildung 6-5: Vorher/Nachher Häufigkeitsverteilung der Durchlaufzeit ZDL	130
Abbildung 6-6: Mittlere Durchlaufzeit ZDL_m im Modul Sintern	131
Abbildung A-0-1: Formen der Materialflussskomplexität nach Lödning [LÖD08b, S. 105]	158
Abbildung A-0-2: Verlagerung der Produktentstehung in die Auftragsabwicklung (vgl. [BUL09])	159
Abbildung B-0-1: Beispiel einer durchgeführten Wertstromanalyse in der Prozesskette .	160
Abbildung B-0-2: „Vor-Ort“ Wertstromanalyse einer abgegrenzten Produktgruppe [HÄF13]	160
Abbildung B-0-3: Vergrößerung der Diagramme aus Abbildung 2-13	161
Abbildung C-0-1: Visualisierung der Maschinen- und Auftragszustände im Modul Grünbearbeitung	162
Abbildung C-0-2: Fertigungsleitstand zur Feinplanung/-steuerung Modul Hartbearbeitung	163
Abbildung C-0-3: Laufzeitprotokoll zur Echtzeit-Visualisierung von Maschinenzuständen (Legende siehe Abbildung C-1)	163
Abbildung C-0-4: Regelmäßig automatisiert verteiltes Schicht-Cockpit für das Shop-Floor-Management	164
Abbildung D-0-1: Beispiel der Umsetzung von Abläufen der schlanken Produktion im Modul Presserei	166

Formelverzeichnis

Formel 4-1: Mittlerer Bestand im Auftragspuffer	98
Formel 4-2: Mittlere Reichweite im Auftragspuffer	99
Formel 4-3: Mittlere Leistung im Abgang durch das Modul Hartbearbeitung	99
Formel 6-1: Zusammenhang der drei Zeitgrößen für Einzelwerte je Arbeitsvorgang:	126
Formel 6-2: Ungewichtetes arithmetisches Mittel der Durchlaufzeit:	126
Formel 6-3: Mittlerer Flussgrad:	126
Formel 6-4: Mittlere Leistung und Auslastung.....	127
Formel 6-5: Standardabweichung der mittleren Durchlaufzeit	130

Formelzeichen

ZDL_i	Durchlaufzeit
ZAU_i	Auftragszeit
ZUE_i	Übergangszeit
ZDF_i	Durchführungszeit
ZDL_m	Mittlere Durchlaufzeit
ZAU_m	Mittlere Auftragszeit
ZUE_m	Mittlere Übergangszeit
ZDF_m	Mittlere Durchführungszeit
B_m	Mittlerer Bestand
R_m	Mittlere Reichweite
L_m	Mittlere Leistung
FB	Bestandsfläche
$B_{max/min}$	Minimaler/maximaler Bestand
$R_{min/max}$	Minimale/maximale Reichweite
σ_{ZDL_m}	Standardabweichung mittlere Durchlaufzeit
FG_m	Mittlerer Flussgrad
A_m	Mittlere Auslastung
L_m	Mittlere Leistung
ZDL_{me}	Median Durchlaufzeit

Abkürzungsverzeichnis

PPS	Produktionsplanung und -steuerung
GPS	Ganzheitliches Produktionssystem
BDE	Betriebsdatenerfassung
MA	Mitarbeiter
SiC	Siliziumcarbid
WIP	Work in Progress (deutsch: Umlaufbestand)
KE	Kapazitätseinheit
ERP	Enterprise Ressource Planning
MRP	Material Requirement Planning
RFID	Radio Frequency Identification (Datenübertragung)
CPS	Cyber-Physical-System
BMWF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
KMU	Kleinere und mittlere Unternehmen
APS	Advanced Planning and Scheduling
BOA	Belastungsorientierte Auftragsfreigabe
ConWIP	Constand-Work-in-Progress
DBF	Dezentrale Bestandsorientierte Fertigungssteuerung
DLZ	Durchlaufzeit
EDD	Earliest Due Date
EOF	Engpassorientierte Fertigungssteuerung
FIFO	First-In-First-Out
IT	Information Technology
kg	Kilogramm
KOZ	Kürzeste Operationszeit
RsPR	Rückstandsorientierte Produktionsregelung
TKS	Terminorientierte Kapazitätssteuerung
TFS	Taktorientierte Fertigungssteuerung
FCFS	First-Come-First-Serve
MDE	Maschinendatenerfassung
MES	Manufacturing Execution System
i. d. R.	in der Regel
z. B.	zum Beispiel
Min	Minute
BKT	Betriebskalendertag
SiC	Siliziumcarbid
OEM	Original Equipment Manufacturer (deutsch: Erstausrüster)

1 Einleitung

Steigende Anforderungen an die Produktqualität, eine hohe Dynamisierung der Produktlebenszyklen und zunehmender Kostendruck erfordern eine kontinuierliche Verbesserung der Prozesse [SPA13]. Produkte müssen in immer kürzerer Zeit entwickelt und möglichst mit sinkenden Kosten und steigender Qualität auf den Markt gebracht werden [BRA11]. Dies stellt auch Zulieferer von Schlüsselkomponenten vor die Herausforderung, sich im Wettbewerb eines derart turbulenten Umfeldes abzugrenzen und zu behaupten. Aus den genannten vielschichtigen Anforderungen entsteht die Notwendigkeit, Reaktionszeiten zu senken.

Dabei bildet die Liefertreue nach einer aktuellen Umfrage die mit Abstand führende logistische Zielgröße für ca. 65% der befragten Unternehmen in Deutschland. Eine dadurch steigende Komplexität in der Steuerung von Produktionsprozessen zu beherrschen, während die Transparenz der Produktionsprozesse und des Produktionsprogramms stark abnimmt, ist die Herausforderung für eine erfolgreiche Produktionsplanung und -steuerung auch innerhalb von Marktnischen. (vgl. [SCH13b])

Dies gilt im Besonderen für Unternehmen der Einzelteil- und Kleinserienfertigung von komplexen Teilen aus Sinterwerkstoffen. Hier besteht eine noch weitaus höhere Komplexität, welcher mit flexibler Gestaltung von Produktionsstrukturen und den Prozessen in Planung und Organisation begegnet werden muss. Eine hohe Integrationstiefe und verständliche Wirkmechanismen der Prozesse in der PPS sind zentrale Elemente zur Erfüllung dieser Anforderungen. Kundenindividuelle Produkte in kleinen Losgrößen, sowie die Kurzfristigkeit der Auftragsfertigung erhöhen den Aufwand in der Auftragsabwicklung. „Kurze Lieferzeiten erfordern verschwendungsarme Prozesse entlang der gesamten Auftragsabwicklungskette“ [GRU10, S. 2].

Ganzheitliche Produktionssysteme¹ (GPS) basieren auf entsprechenden Prinzipien, um diese Anforderungen bei hoher Sortenvarianz und kleinen Losgrößen zu erfüllen [DOM09]. Um Produktionsstrukturen hierbei nachhaltig anzupassen und geeignete Steuerungsstrategien zu entwickeln, ist eine stetige Optimierung von Methoden und Instrumenten der Planung und Steuerung in Produktionssystemen erforderlich. Die hohen Erfahrungen der Automobil- und Großserienproduktion liegen in derartigen Unternehmen dazu meist nicht vor. Diese Arbeit soll einen Beitrag dazu liefern, wie die Produktionssteuerung unter den oben aufgeführten Einflüssen mit den speziellen Anforderungen innerhalb einer von verfahrenstechnischen Prozessen geprägten Branche verbessert werden kann.

¹ Ein Ganzheitliches Produktionssystem (GPS) ist ein unternehmensspezifisches, methodisches Regelwerk zur umfassenden und durchgängigen Gestaltung der Unternehmensprozesse in der Produktion. (nach VDI-Richtlinie 2870-1 vgl. [VDI12])

1.1 Problematik

Die genannte Veränderung des Marktes führt dazu, dass sich in den vergangenen Jahren die wesentlichen Produktionsstrategien geändert haben, um durch Flexibilität der Problematik, komplexer und schwankender Produktionsprogramme zu begegnen [PAW14]. Dieser Wechsel in der grundlegenden Ausrichtung der Produktion wird in Abbildung 1-1 dargestellt.



Abbildung 1-1: Gegenüberstellung von Produktionsstrategien (vgl. Pawellek [PAW14, S. 6])

Als besonders wichtiger Faktor kann dabei die Ausrichtung auf eine materialflussorientierte und kundenauftragsbezogene Steuerung gesehen werden. Hier entstehen maßgebliche Einflussfaktoren für das Produktionsprogramm sowie die Planung und Steuerung.

Auch eine spezialisierte Branche, wie beispielsweise die Hersteller von kundenspezifischen Hochleistungskomponenten aus Sinterwerkstoffen, steht vor diesen Herausforderungen. Der bestehende Vorsprung auf Grundlage einer technologischen Differenzierung gegenüber Wettbewerbern sinkt. Innovationsstrategien alleine reichen nicht aus, um weiterhin profitabel zu wachsen. Entsprechend WILDEMANN besteht die Herausforderung nicht nur darin, neue Märkte überhaupt mit innovativen Produkten zu beliefern, vielmehr gilt es, die Wünsche der Kunden nach individuellen Produkten in immer kürzerer Zeit zu erfüllen [WIL94]. Unternehmen, deren Erzeugnisse auf Basis ihrer strategischen Ausrichtung auf einer sehr anspruchsvollen Kundenspezifikation und Produktdifferenzierung beruhen, sind oft in einer Kleinserienfertigung bzw. nach dem Verrichtungsprinzip² (Werkstattfertigung) organisiert [VIE01].

² Die Fertigung nach dem Verrichtungsprinzip, auch funktionale Fertigung oder Werkstattfertigung genannt, ordnet die Arbeitsplätze nach den Bearbeitungsverfahren [WIE14b]. Eine detailliertere Betrachtung erfolgt in Abschnitt 2.1.4.

Das bietet einerseits Möglichkeiten sehr flexibel auf sich ändernde Produkte bzw. Kundenwünsche zu reagieren. Andererseits ergibt sich oft eine höhere Konzentration von technologischem Wissen über Maschinen und Verfahren. Niedrigere Produktionsmengen, komplexere Abläufe, stärker diversifizierte technische Grundvoraussetzungen und ein hoher Aufwand in der Verfahrensentwicklung können gegenüber einer Serienfertigung nach SCHIRRMESTER nur kompensiert werden:

„Durch die Fähigkeit, mit technologisch führenden Produkten und einer flexiblen und leistungsfähigen Produktion kundenspezifische Produkte höchster Qualität herstellen zu können.“ [SCH03, S. 72]

Im Umfeld der Hersteller von Sinterbauteilen für die Anwendung im Maschinen- und Anlagenbau liegt eine vergleichbare Problematik vor. Die Schwierigkeit in der Einzelteil- und Kleinserienfertigung von Hochleistungskeramiken³, besteht darin bei individuellen komplexen Produkten alle Prozessdetails zu kennen. Unter der Vielzahl von Prozessen gilt es diejenigen mit relevanter Wertschöpfung und deren Engpässe zu finden, durch die das Gesamtergebnis positiv beeinflusst werden kann. In diesem Bereich erfolgt selten eine effektive Auftragssteuerung unter Berücksichtigung der aktuellen Produktionssituation. Die gesteigerte Komplexität und die Intransparenz über den aktuellen Auftragsfortschritt in der Produktion münden häufig in einer Nicht-Einhaltung zugesagter Lieferfristen (vgl. [OST12]). Der Produktionssteuerung kommt in diesem Kontext eine entscheidende Bedeutung zur Erreichung der logistischen Zielgrößen zu. „Mit einer kurzen Durchlaufzeit und hohen Termintreue unterstützt man die Logistikleistung, die über die erreichte Liefertermintreue und Lieferzeit aus Kundensicht bewertet wird.“ [BOR09, S. 38]

Trotz der hohen Bedeutung ist die logistische Zielerreichung in vielen Fällen verbesserungswürdig. Zum Teil ist dies einer mangelnden Kenntnis der logistischen Zusammenhänge geschuldet. So erhoffen sich viele Unternehmen Fortschritte durch die Einführung eines neuen IT-basierten PPS-Systems oder verbesserter Verfahren. Es bleibt jedoch – abgesehen von der häufig bemühten höheren Transparenz – weitgehend unklar, wodurch diese Verbesserungen genau erzielt werden sollen. (vgl. [LÖD08a])

In Beispielen, die dieser Arbeit zugrunde liegen, wird die erwähnte Problematik weiter verstärkt. Hier entstehen aufgrund der Fertigungsstruktur, der komplexen technischen Prozesse und der hohen Produktvielfalt besondere Steuerungsproblemfälle. Inhomogenität durch die Vielzahl von technischen Prozessen, Maschinen und Verfahrens- bzw. Arbeitsabläufen machen einen standardisierten Produktionsablauf unmöglich. Diese Komplexität wird in Abbildung 1-2 dargestellt und anhand des logistischen Leitbilds qualifiziert eingeordnet. Individualisierte Abläufe durch technologische Restriktionen und unsichere Pro-

³ Hochleistungskeramik bzw. Ingenieurkeramik wird als „Konstruktionswerkstoff mit besonderen Herstellungsverfahren“ im Maschinenbau eingesetzt und ist vergleichbar mit den Werkstoffen der Pulvermetallurgie und anderen Metall-Keramik-Verbundwerkstoffen (Sinterwerkstoffe) in der Prozess- und Verfahrenstechnik der Herstellung [BÖG15, S. E68ff.].

zesse ergeben gemeinsam mit externen Anforderungen (z. B. Lieferzeit, Liefertoleranz) ein turbulenzorientiertes logistisches Leitbild. Im Gegensatz zu flussorientierten „Auftragsströmen“ charakterisiert dieses Leitbild die Steuerung komplexer sich überholender und kreuzender „Fertigungspfade“ (vgl. [WIE02]).

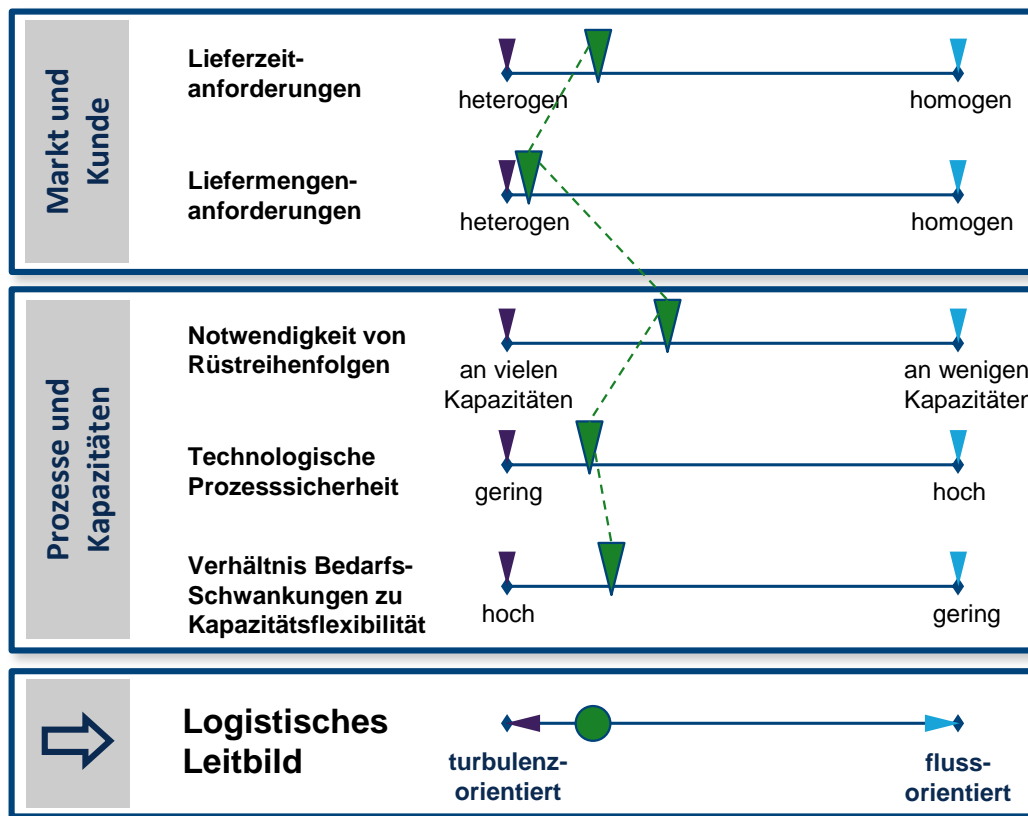


Abbildung 1-2: Einflussfaktoren für die Auswahl des logistischen Leitbilds
(in Anlehnung an WIENDAHL [WIE02])

Viele Autoren (vgl. BORNHÄUSER [BOR09], OSTGATHE [OST12], BUHL [BUH12], WIENDAHL [WIE02]) betonen die hohen Anforderungen für die Produktionssteuerung, die ein stark heterogener Auftragsfortschritt bei funktionaler Produktionsorganisation in einer turbulenzorientierten Ausrichtung mit sich bringt. Zwar existieren hierbei auch einige theoretische Ansätze zu verbesserten Methoden der Steuerung aus verschiedenen Perspektiven im Produktionssystem (vgl. DEUSE [DEU11], FUCHS [FUC13], KIENZLE [KIE11], KÄMPF [KÄM97]). Dennoch wurde das dieser Arbeit zugrunde liegende Steuerungsproblem der „**verfahrenstechnisch verketteten Werkstattfertigung**“⁴ bis dato nicht ausreichend wissenschaftlich vertieft untersucht und wertstromorientiert betrachtet. So ergeben sich Fragestellungen zur Optimierung der gesamten Produktions- und Auftragssteuerung, die einer grundsätzlichen theoretischen Betrachtung bedürfen. Die Fokussierung auf einen einzel-

⁴ Der Begriff der „verfahrenstechnisch verketteten Werkstattfertigung“ grenzt den Untersuchungsbereich dieser Arbeit in Bezug auf die Fertigungsart ein und wird im Kapitel 2 weiter detailliert.

nen Optimierungsfall reicht nicht mehr aus, um die auftretenden Probleme zu lösen. Stattdessen muss eine umfassende Lösung in Form einer Gesamtbetrachtung und Modellierung der theoretischen Zusammenhänge erarbeitet werden. Die Herausforderung besteht darin, diese Verbesserungspotentiale im Kontext eines ganzheitlichen Produktionssystems zu verstehen. Darauf basierend gilt es die Wirklogik in der Fertigungssteuerung für eine konkrete industrielle Wertschöpfungskette zu konzipieren und dieses theoretische Modell in einen Produktionsbetrieb zu übertragen.

Dementsprechend bietet die Fertigungssteuerung im komplexen Umfeld der Sinterprodukte in der Kleinserienproduktion ein vielversprechendes Untersuchungs- und Verbesserungspotential mit einer direkten Relevanz für die betriebliche Praxis.

1.2 Motivation und Zielsetzung

Vor dem Hintergrund der einleitend beschriebenen Herausforderungen besteht Einigkeit über die Bedeutung der logistischen Zielerreichung für den Unternehmenserfolg zwischen Wissenschaftlern und Praktikern [BEG05].

„Der Bereich der Produktionssteuerung weist bis heute erhebliche Defizite auf, weshalb keine ausreichende logistische Leistungsfähigkeit erreicht wird.“ [NYH08b, S. 213]

„Die Konfiguration und Umsetzung eines geeigneten Produktionssteuerungssystems ist von zentraler Bedeutung für jedes Unternehmen, um seine logistische Zielerreichung zu verbessern.“ [GER05, S. 436]

Aus der Problemstellung ergibt sich die Motivation, einen Beitrag für eine bessere logistische Leistungsfähigkeit in der **verfahrenstechnisch verketteten Werkstattfertigung** zu leisten. Das auftretende Dilemma zu hoher Bestände, bei gleichzeitig zu verbessernde Liefertreue und Reduktion der Durchlaufzeiten, zeigt in diesem Produktionsumfeld hohe Potentiale.

Die im Rahmen dieser Arbeit betrachtete individuelle Planung und Durchführung von Produktionsabläufen führt gerade hier zu einem erhöhten Informations- und Koordinationsbedarf in der Produktion (vgl. REICHWALD [REI06], GÜNTNER [GÜN06]). Informationen zum aktuellen Produktstand und Auftragsstatus bieten durch Einbezug in die Produktionssteuerung, z. B. durch aktuelle BDE-Daten⁵ oder weiterentwickelte Softwarelösungen in Echtzeit, ein zielorientiertes Optimierungspotential (vgl. ZAEH [ZAE12], UHLMANN [UHL15]). Um die **Wirkzusammenhänge** dieses Steuerungsproblems zu verstehen, müssen jedoch ne-

⁵ Betriebsdatenerfassung (BDE), vgl. Kapitel 3.4 „Information und Kommunikation“.

ben den informationstechnischen **Steuerungsprozessen** auch die Prozesse der **Planung** und des **Materialflusses** in der realen Produktion einbezogen werden.

Aus dieser wissenschaftlichen Motivation heraus wurden Fragestellungen entwickelt, die innerhalb dieser Arbeit die Grundlage der theoretischen Betrachtung bilden:

- Was bedeutet eine wertstromorientierte Ausrichtung der Produktionssteuerung für die verfahrenstechnisch verkettete Werkstattfertigung?
- Welche Wirkzusammenhänge bestehen innerhalb des Steuerungsmodells und welche Handlungsempfehlungen ergeben sich daraus?
- Welche bekannten Ansätze der Produktionssteuerung können bei den theoretischen Überlegungen als Bausteine verwendet werden?
- Welchen Beitrag liefert die Übertragung der erarbeiteten Erkenntnisse in die betriebliche Praxis?
- Wodurch ergibt sich in der betrieblichen Praxis eine reale Steigerung der Transparenz und an welchen Kriterien ist diese messbar?
- Ist es möglich Komplexität zu reduzieren indem vollständige Flexibilität kontrolliert zugelassen wird?
- Wie kann eine Steigerung der Informationsqualität und eine Verringerung der Komplexität für die beteiligten Prozesseigner in Planung, Steuerung und Produktion erreicht werden?
- Lassen sich die Aufgaben von Planung und Steuerung in einer vernetzten Logik der Produktionssteuerung weiterhin trennen?

Die Forschungsmotivation begründet sich darin, diese aufgestellten Fragen zu verstehen, und in Form eines ganzheitlichen Steuerungskonzeptes einen Lösungsansatz zu entwickeln.

Das Ziel dieser Arbeit lässt sich daher wie folgt formulieren:

Die Zielsetzung ist die Entwicklung eines ganzheitlichen Steuerungsmodells, das die Wirkzusammenhänge der wertstromorientierten Steuerung einer komplexen heterogenen Prozesskette der Einzel- und Kleinserienproduktion exemplarisch erklärt. Auf dieser Basis sollen auch vergleichbare produzierende Unternehmen Turbulenzen des Wertstroms minimieren, die Komplexität in Planung und Steuerung beherrschbarer machen, und ihre logistische Leistungsfähigkeit verbessern können.

Die Zielsetzung eines ganzheitlichen Lösungsansatzes in Form von schlanken Prozessen entlang der gesamten Auftragsabwicklungskette bedingt die Betrachtung des kompletten Produktionssystems. Nach DOMBROWSKI „kann sich heute kaum ein Unternehmen erlauben, nicht mit einem GPS zu produzieren“ [DOM15, S. 20], welches die aktuelle Relevanz dieser grundsätzlichen Betrachtungsweise bekräftigt. Innerhalb dieser Forschungsarbeit können jedoch nicht alle Aspekte des GPS behandelt werden.

Der wesentliche Anspruch dieser Arbeit ist, neben der Erweiterung des Wissens eines neuen Fertigungssteuerungskonzeptes, auch die Umsetzung der Erkenntnisse zur Lösung konkreter Problemstellungen in der betrieblichen Praxis.

1.3 Aufbau und Vorgehensweise

Die vorliegende Arbeit kann in den Bereich der anwendungsorientierten Wissenschaften eingeordnet werden, da die Zielsetzung sowohl einen theoretischen als auch einen praktischen Beitrag leistet. Das Modell wird nicht anhand des empirischen Beweises der Gültigkeit einzelner Theorien bewertet, sondern anhand der praktischen Anwendbarkeit [ULR81]. Nach ULLRICH & HILL beziehen sich die angewandten Wissenschaften auf die Beschreibung, Erklärung und Gestaltung empirisch wahrnehmbarer Wirklichkeitsausschnitte [ULR76]. Die Idee zu diesem Dissertationsvorhaben ist im Rahmen einer mehrjährigen Industrietätigkeit in einem Produktionswerk für Sinterbauteile entstanden. Die Problemstellung steht damit im unmittelbaren Zusammenhang zur Praxis. Die bestehende Realität der Fertigungssteuerung zu Beginn der Untersuchungen ist Ausgangszustand innerhalb des komplexen Systems eines realen Produktionsstandortes in der Einzelteil- und Kleinserienfertigung.

Die systematische Vorgehensweise unterstützt die Entwicklung und Konfiguration eines neuen Steuerungsmodells. Die Basis dafür bilden geeignete Grundlagen unter Nutzung der konkreten Ausgangssituation in Form des analysierten Unternehmens, das im späteren Verlauf der Arbeit wiederum als Gegenstand der Validierung genutzt wird. Hier erfolgen der Nachweis der Funktionalität des neuartigen Konzeptes und die Beantwortung der Forschungsfragen bzw. auch die konkrete Benennung von Verbesserungen in der praktischen Anwendung. Diese wesentlichen Bausteine sowie die Zuordnung der Kapitel sind in Abbildung 1-3 dargestellt.

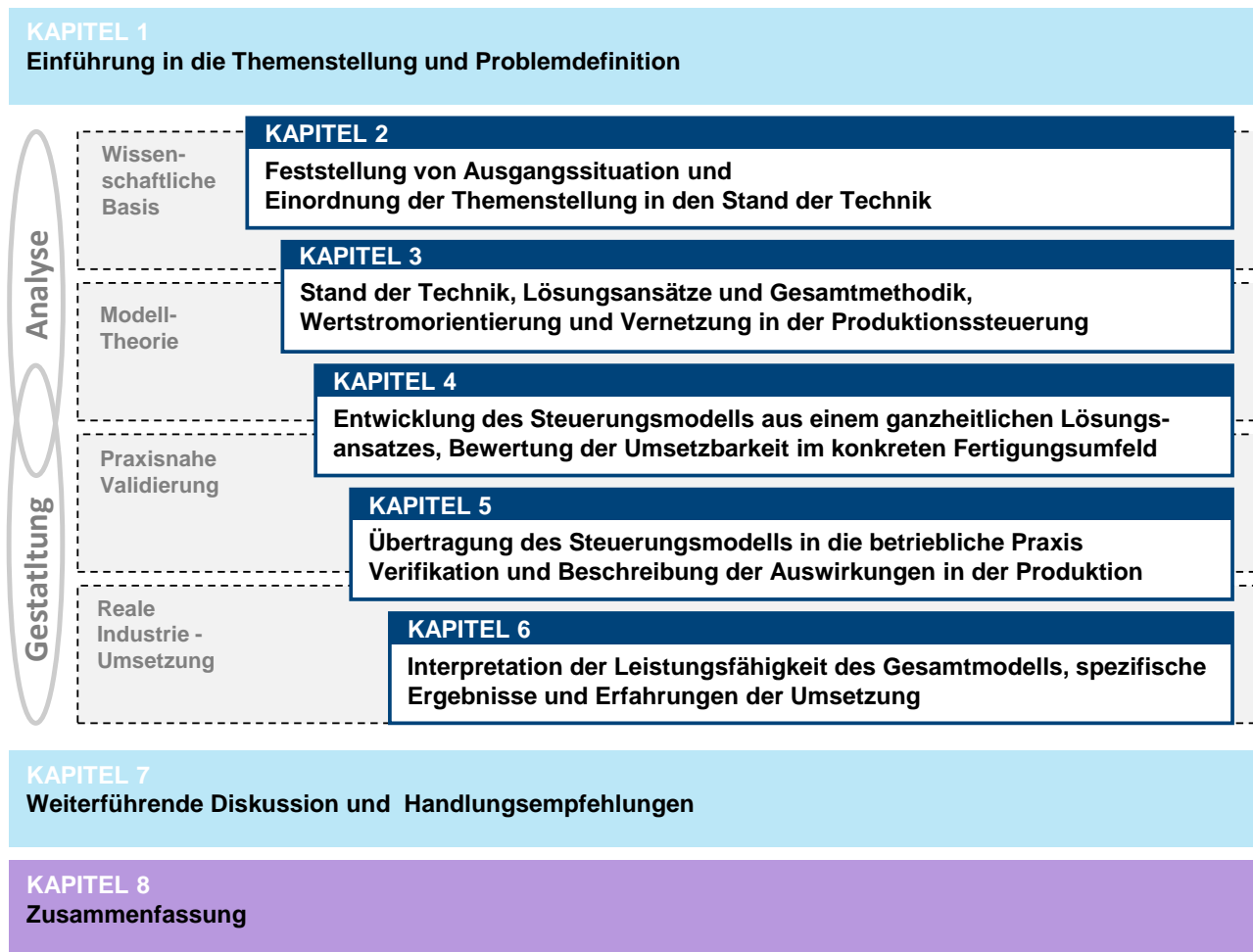


Abbildung 1-3: Wesentliche Bausteine und Aufbau der Arbeit

Die Arbeit lässt sich aufgrund der gewählten Struktur in einen Analysebereich und einen Gestaltungsbereich unterteilen. Die Bausteine im Analysebereich sind durch die **wissenschaftliche Basis** und die **Modelltheorie** gekennzeichnet. In den Gestaltungsbereich wird dies durch die **Praxisnahe Konfiguration und Verifikation** sowie die **reale Industrieumsetzung** überführt (vgl. Abbildung 1-3). Die einzelnen Kapitel sind den Bausteinen zugeordnet und stellen teilweise den Übergang zwischen den Bausteinen her:

Eine Einleitung führt in die Themenstellung ein, zeigt aktuelle Probleme auf und beschreibt die Rahmenbedingungen, die diese Arbeit übergreifend beeinflussen. Im **Kapitel 2** wird die Ausgangssituation konkretisiert und in diesem Zusammenhang die besonderen Herausforderungen bei der variantenreichen Herstellung von komplexen Bauteilen aus Sinterwerkstoffen erläutert.

Das **Kapitel 3** stellt aktuelle Modelle und Methoden der Produktionssteuerung vor, diskutiert den Stand der Technik und erklärt die Bedeutung einer wertstromorientierten Betrachtungsweise im ganzheitlichen Produktionssystem.

Insbesondere im **Kapitel 4** wird die vorhergehende Betrachtung aus dem Analysebereich mithilfe der theoretischen Lösungsentwicklung und der Überleitung zur Konfiguration einer

verbesserten Produktionssteuerung in den Gestaltungsbereich überführt. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte eigenständige Lösungsmodell, soll die betrieblichen Herausforderungen im konkreten Fall mit möglichst großer Breite abdecken, bzw. Rahmenbedingungen dafür aufzeigen.

Im weiterführenden **Kapitel 5** finden die Übertragung des erstellten Modells und die konkrete Implementierung in das genannte Praxisbeispiel statt. Die Zusammenführung der wissenschaftlichen Erkenntnisse und die Ableitung des Handlungsbedarfs aus Sicht der Praxis erfolgt anhand von Beispielen.

Das **Kapitel 6** beschäftigt sich mit der Überprüfung der Gesamtmethodik und verifiziert die gewählte Vorgehensweise, um die Erkenntnisse der Umsetzung und etwaige Schwachstellen zu identifizieren. Die Benennung der spezifischen Erfahrungen im praktischen Umfeld und der gewählte Lösungs- und Umsetzungsweg sowie die Übertragbarkeit dieser Erkenntnisse wird kritisch hinterfragt.

Ergänzend dazu erläutert **Kapitel 7** weiterführende Verbesserungspotentiale und Ansätze für Folgearbeiten. Auf dieser Basis werden innovative Weiterentwicklungsmöglichkeiten und wirtschaftliche Potentiale für eine noch weiter fortschreitende Implementierung ersichtlich.

Die wichtigsten Erkenntnisse dieser Arbeit fasst abschließend das **Kapitel 8** zusammen. Hierbei können die aufgestellten Forschungsfragen beantwortet und konkrete Ergebnisse benannt werden.

2 Ausgangssituation und Gestaltungsbereich

Das vorliegende Kapitel dient der Beschreibung der relevanten Ausgangssituation und Herausforderungen innerhalb des Analysebereiches, auf denen die Ausführungen in den Folgekapiteln aufbauen. Im Anschluss wird der abgeleitete Handlungsbedarf und die Themenstellung der Arbeit konkretisiert, um festzustellen, vor welcher Herausforderung die derzeitige Produktionssteuerung bezogen auf die zu erreichenden Ziele steht.

2.1 Rahmenbedingungen der variantenreichen Produktion von Sinterbauteilen

Dieses Unterkapitel beschreibt aktuelle Marktentwicklungstendenzen und deren Auswirkungen auf die Produkte und die Organisationsform der Produktion. Dabei wird aufgezeigt, welche Anforderungen durch die Fertigungsart, das Produktionsprogramm und die technologische Sonderstellung an die Produktionssteuerung gestellt werden. Die wichtigsten Anforderungen werden anhand der in Abbildung 2-1 dargestellten Einflussfaktoren auf die Organisationsform der Produktion dargestellt.

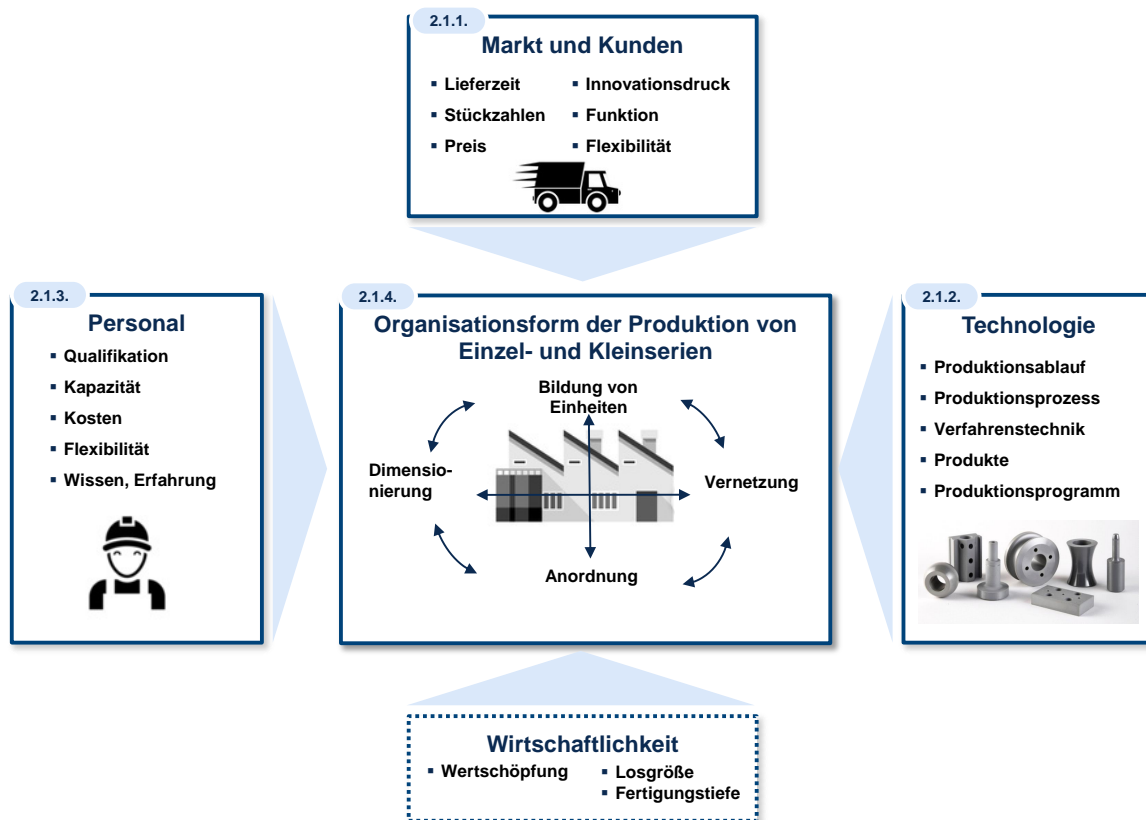


Abbildung 2-1: Überblick über Einflüsse auf die Organisationsform der Produktion (in Anlehnung an [FUC13])

Aus der Kundensicht fordern vor allem die Lieferzeit, der Preis und die zu erreichende Flexibilität [WIE14b]. Die eingesetzten Technologien, Verfahren und eine existente Personalstruktur stellen die interne Basis dar, wobei die Wirtschaftlichkeit nicht explizit betrachtet wird. Diese Art und Weise der Klassifizierung der Produktion charakterisiert Unternehmen mit vergleichbaren Produktionsstrukturen in diesem Kapitel unter Einbezug der steuerungsrelevanten Kriterien.

2.1.1 Marktanforderungen und Entwicklungstendenzen

Die in Kapitel 1 erläuterten Markttendenzen zeigen Auswirkungen auf die Zulieferer von Bauteilen aus Sinterwerkstoffen. Neben der steigenden Komplexität des Marktes werden sowohl die Produkte, einschließlich deren Entwicklung und Prototypenbau, komplexer und zugleich die logistischen Anforderungen in der Produktion erhöht.

Märkte

Sinterwerkstoffe, wie Hochleistungskeramiken oder Hartmetalle, stehen vor wachsenden und immer weiter diversifizierten Anwendungen (vgl. [VDI14]). Eine hohe Marktdurchdringung wird aber nur gelingen, wenn der Einsatz von Hochleistungskeramiken entweder zu einer Effizienzsteigerung des Gesamtsystems führt, zur Erhöhung der Funktionalität, oder zu einer Kostensenkung bei der Herstellung. Letzteres wird in der Regel weniger oft der Fall sein, da Hochleistungskeramiken meist über pulvermetallurgische Verfahren⁶ aus vergleichsweise teuren synthetischen Rohstoffen hergestellt werden [HOF15].

Den Herstellern stehen gegenwärtig die unterschiedlichsten Rohstoffe für verschiedene Anwendungsbereiche und Märkte zur Verfügung. Dabei erfüllen die daraus hergestellten Werkstoffe und -stücke die wesentlichen chemischen oder physikalischen Eigenschaften⁷, um sich von anderen bekannten, z. B. metallischen, Werkstoffklassen abzuheben. Besonders im Maschinen- und Anlagenbau stehen die Materialien unter diesem Wettbewerb und sind aufgrund ihrer Kostenstruktur stets auf den Nachweis ihrer überlegenen Eigenschaften angewiesen [DEU14]. Einen aus diesen Eigenschaften entwickelten Überblick über die Markt- und Produktvielfalt zeigt die Abbildung 2-2. Dabei wird festgestellt, dass über die Märkte und Produkte gewisse Synergien zwischen Hartmetall- und Keramikbauteilen existieren. Der umgrenzend eingezeichnete Bereich stellt für die darauf folgende Betrachtung der Produkte, Technologien und Produktion eine Einschränkung dar.

⁶ Verfahren, bei dem i.d.R. durch mechanisches Pressen von Pulvern und Sintern unterhalb der Schmelztemperatur Halbzeuge und Formteile hergestellt werden. Für die Sintertechnik, das dominierende Verfahren der Hochleistungskeramiken, hat sich bei Metallbasis-Werkstoffen der Begriff Pulvermetallurgie geprägt. [SCH07]

⁷ Z. B. zeichnen sich Keramiken durch große elastische Steifigkeit, hohe Festigkeit, insbesondere unter Druckbelastung, gute chemische Beständigkeit sowie hohe Temperaturbeständigkeit aus. (vgl. [RÖS06, S. 227ff.]). Die Übersicht der Eigenschaften in Anhang A verdeutlicht das.

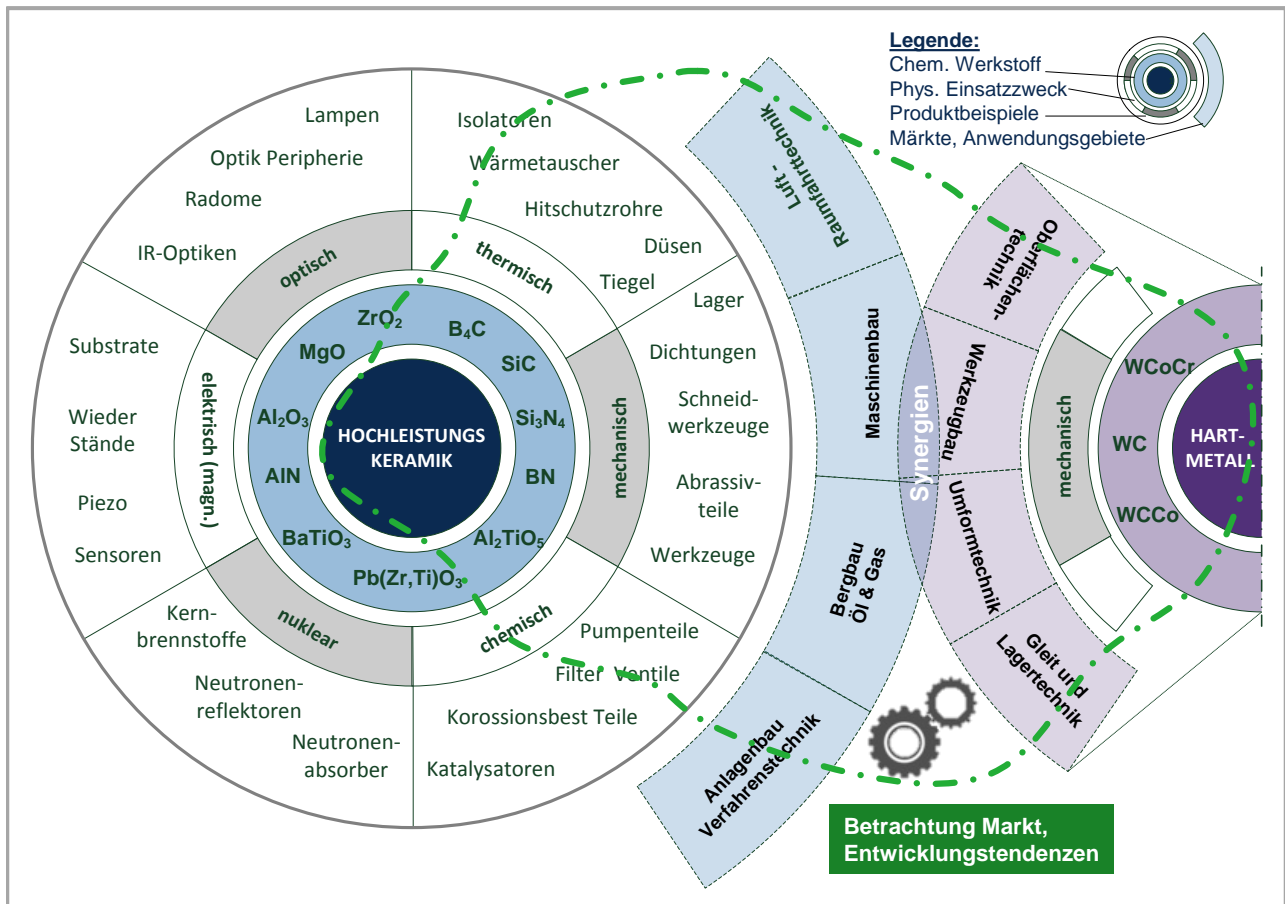


Abbildung 2-2: Technisches Marktumfeld dieser Arbeit (erweitert aus [ARZ14])

Die genannten Produkte profitieren von einem Wachstum in **etablierten** aber auch **neuen** Anwendungsgebieten und besitzen eine herausragende Bedeutung als **Schlüsselkomponenten**. Hier beeinflussen sie das Leistungsprofil von ganzen Systemen wettbewerbsentscheidend (vgl. [DEU14]). Das Marktumfeld dieser Arbeit wird durch zahlreiche kleinere und mittlere Unternehmen vor allem in Europa, den USA, Japan und Korea geprägt, die als materialspezifische Zulieferer eng mit entsprechenden Systementwicklern und OEMs zusammenarbeiten.

Marktanforderungen

Der Wunsch nach einer deutlichen Reduzierung der Lieferzeiten bei gleichzeitiger Erhöhung der Fertigungsliefertreue stellt die zentrale Anforderung des Marktes dar. Sinterwerkstoffe sind aufgrund ihrer Kostenstruktur immer einem erhöhten Wettbewerb ausgesetzt. Die Tabelle 2-1 fasst diese Anforderungen zusammen:

Tabelle 2-1: Zusammenfassung Marktanforderungen an Produkt und Produktion

Lieferzeit	Kurze Lieferzeit und gleichzeitig hohe Liefertreue sind zentrale Anforderungen. Es ist wettbewerbsentscheidend eine Auftragsabwicklungszeit von < 5-6 Wochen für kundenindividuelle Produkte mit technischer Lösungsentwicklung zu erreichen.
Kosten	Steigender Kostendruck um im Wettbewerb mit anderen Hochleistungsmaterialien zu bestehen stellt die Forderung zur Reduktion der Herstellkosten. Hohe Materialkosten müssen durch kontinuierliche Verbesserung der Produktions- und Auftragsabwicklungsprozesse kompensiert werden.
Stückzahlen	Bis auf wenige Ausnahmen liegt kein Massenmarkt vor. Forderung ist, Bauteile auf Anfrage für Anwendungen herzustellen („ make-to-order “). Die Stückzahlen liegen im Bereich von Einzelteilen bis Kleinserien . Es liegen zum Großteil Einzelbestellungen bzw. Kleinserien mit mehreren Lieferabrufen vor.
Innovation	Kundenspezifische Produkte beinhalten Entwicklung oder Machbarkeitsbewertung. Die Produktentstehung und Auftragsabwicklung sind zeitlich bei vielen Produkten nicht zu trennen („ engineer-to-order “) ⁸ . Produkten wird die Rolle als Wegbereiter für leistungsfähigere Systeme abverlangt. Kurzfristige Prototypen fordern schnelle Reaktionszeiten und erhöhen zusätzlich die Komplexität. In der Einzelteil- und Kleinserienproduktion ist dies aufgrund der Kosten von hochspezialisierten Anlagen nur in der Produktion möglich.
Material	Die Hersteller sind aufgefordert möglichst viele Materialtypen anbieten zu können, da die Anwendung als Schlüsselkomponente nur Bauteile mit für den Einsatzzweck idealen Eigenschaften zulässt.
Geometrie	Die Abdeckung einer möglichst großen Breite von Dimensionen, Genauigkeiten und Formen sind notwendig um flexibel auf Kundenwünsche reagieren zu können und erhöhen die Komplexität der Fertigungstechnik.

Die vorliegende Tabelle 2-1 basiert auf Expertengesprächen und Analysen des Kundstammes des Segmentes *Konstruktionsbauteile* des Beispielunternehmens H.C. Starck und den Erfahrungen in der Zusammenarbeit mit weiteren Unternehmen der bereits eingegrenzten Branche.

⁸ vgl. „Verlagerung der Produktentstehung in die Auftragsabwicklung“ in Anhang A

Vielfalt der Produkte

Um die vorgestellten Märkte und deren Anforderungen zu erreichen und gleichzeitig mit hoher Flexibilität im Wettbewerb bestehen zu können, sind die Zulieferer von Hochleistungsbauteilen aus Sinterwerkstoffen aufgefordert, eine möglichst hohe Material- und Produktvielfalt in der Breite ihrer Machbarkeiten abzudecken. Die in Abbildung 2-3 dargestellten Produkte zeigen die Komplexität des Produktprogramms und stellen lediglich einen Ausschnitt des in Wirklichkeit vorliegenden heterogenen Produktportfolios dar. Als Zulieferer zahlreicher Industrien mit mehreren hundert Kunden werden Produkte für unterschiedlichste Anforderungen wie z. B. Hochtemperatur- und Verschleißschutz, Strukturanwendungen oder den chemischen Einsatz produziert. Diese Vielfalt gilt dabei als repräsentativ für viele Unternehmen dieser Branche.



Abbildung 2-3: Überblick der Produkt- und Materialvielfalt im Betrachtungsbereich [HC 14]

Die aus den Märkten resultierenden **kundenindividuellen Anforderungen** an Geometrie und Materialkombinationen führen zu einer Artikel- und Variantenvielfalt von **mehreren zehntausend Produktlösungen**, die in Form von **Prototypen** und **Unikaten** bis hin zu **Mittelserien** hergestellt werden.

Entwicklungstendenzen und Auswirkungen

Eine hohe und stetig steigende Anwendungsvielfalt in den verschiedensten Märkten bewirkt gemeinsam mit der Tatsache, dass nur wenige Unternehmen die dabei entstehenden technologischen Herausforderungen beherrschen, ein weiteres Wachstum der Produktvielfalt. Viele Produkte stellen eine Erweiterung der bisherigen Machbarkeitserfahrungen dar (vgl. [WAG13]). Um in diesem dynamischen und innovativen Umfeld erfolgreich zu sein, muss die Organisation der Produktion auf diese Gegebenheiten reagieren können. Dies ist jedoch nicht ohne Betrachtung der spezifischen verfahrens- und produktionstechnischen Rahmenbedingungen möglich.

2.1.2 Spezifische Produktions- und Verfahrenstechnik

Der Produktionsablauf für die beschriebenen Bauteile beinhaltet viele mechanische und thermische, sowie kontinuierliche und diskontinuierliche Prozessschritte. Unterschiedliche Werkstoffe wie Siliziumnitrid (Si_3N_4) oder Siliziumcarbid (SiC) bedingen beispielsweise bei der Bauteilfertigung eine spezifische Prozessführung, angepasste Prozessparameter und Erfahrungen im Handling. Diese technologischen Rahmenbedingungen werden in diesem Kapitel vorgestellt. Bei der expliziten Betrachtung einer Bauteilfertigung kann von Rohstoffen in Form von synthetischen Pulvern ausgegangen werden. Der grundsätzliche verfahrenstechnische Ablauf zur Herstellung eines Bauteils aus Sinterwerkstoffen ist in der Literatur bereits ausführlich beschrieben (vgl. [SAL07]; [HÜL14]; [SCH07]; [ARZ14]). Daher werden in dieser Arbeit nur die wesentlichen Rahmenbedingungen betrachtet, die die Organisation der Produktion und die Produktionssteuerung beeinflussen. In Abbildung 2-4 werden die verfahrenstechnische Prozesskette und bedeutsame technische Rahmenbedingungen am Beispiel einer Düse dargestellt.

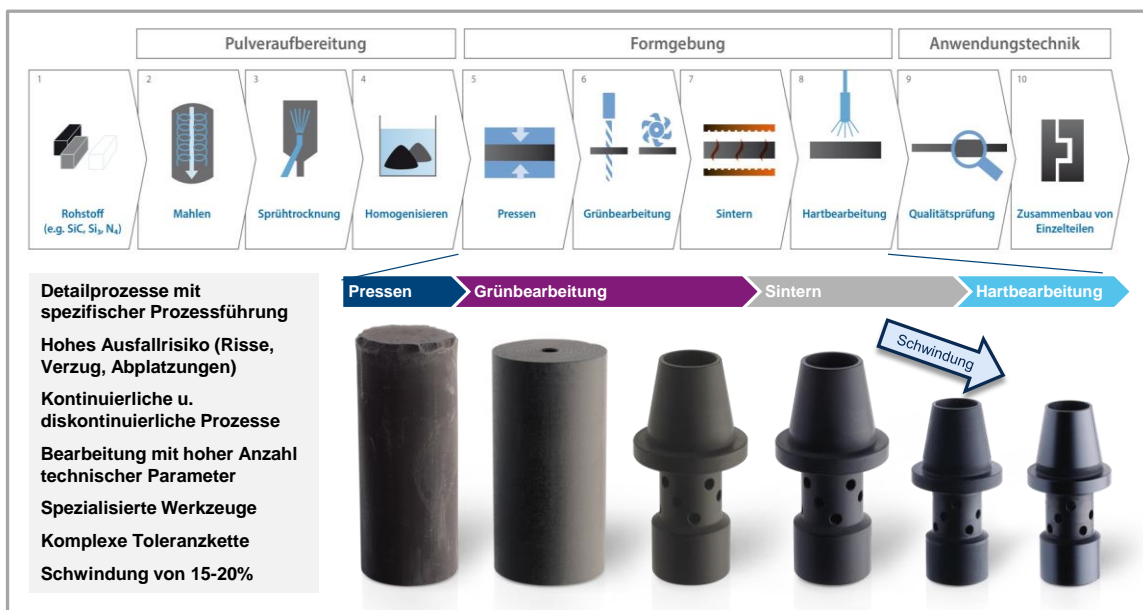


Abbildung 2-4: Prozesskette der Herstellung komplexer Teile aus Sinterwerkstoffen

Der prinzipielle Ablauf der Bauteilfertigung bei der beschriebenen Produktvielfalt ist geprägt von einer Vielzahl von Variationen. Der Hintergrund dafür liegt in der Werkstoffzusammensetzung, den geometrischen Anforderungen und Ansprüchen an Präzision, sowie rein wirtschaftlichen Gegebenheiten, wie beispielsweise Fertigungslosgrößen und Prozesszeiten. Die Anforderungen an die Prozessführung sind im Einzelnen sehr hoch und erzeugen in Summe ein großes Parameterfeld, welches schlussendlich die Produktqualität beeinflusst.

Produktions- und Verfahrenstechnik

Für die Produktion von komplexen Teilen in einer Kleinserie hat sich die vorgestellte Prozesskette sowohl bei Hartmetallen als auch bei Hochleistungskeramiken etabliert. Zur Erreichung der gewünschten Materialeigenschaften sind dennoch für jeden Materialtyp und abhängig von der Bauteilkomplexität eine spezifische Prozessführung oder angepasste Parameter einzuhalten. Insbesondere im Bereich der Formgebung, über die Prozesse des Pressens, der Grünbearbeitung und des Sinterns hinweg, bestehen diese prozessualen Abhängigkeiten, um komplexe Geometrien wirtschaftlich herstellen zu können. Um die auftretende Schwindung bei der Produktkonstruktion zu berücksichtigen, wird immer der Gesamtprozess betrachtet. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das gesinterte Bauteil in der Hartbearbeitung durch kontrollierte Aufmaße nur noch mit i.d.R. Diamantwerkzeugen bearbeitet werden kann, um die geforderten Maße, Oberflächen und Toleranzen herzustellen.

In der praktischen Konsequenz ergibt sich für ein Fertigungswerk zur Bauteilproduktion mit unterschiedlichen Materialien eine Vielzahl von technologischen Bearbeitungsmöglichkeiten, Prozessen und spezifischen Maschinen und Anlagen, um in Bezug auf Größe, Materialtyp und Genauigkeit die genannten Marktanforderungen (vgl. 2.1.1) erfüllen zu können. Die Tabelle 2-2 stellt die einzelnen Verfahrenstechniken und die wesentlichen Einflussfaktoren auf den Produktionsablauf und die Qualität gegenüber.

Tabelle 2-2: Verfahrenstechnik der Prozesskette und Einflussgrößen

Verfahren	Definition	Einflussgrößen
Pressen 	<p>Einfüllen von Pulvern in eine flexible Form, anschließende Evakuierung und kalt-isostatische Verpressung in einem Rezipienten. Nach einem Druckaufbau unter Wasser von 600-1000 MPa wird gesteuert entlastet und der Rohling entformt.</p> <p>Literatur: [HÜL14, S. 52]; [SCH07, S. 128ff.]</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Chargenbetrieb ▪ Material-, größenspezifischer Druck-Zeit-Verlauf ▪ Dichte, Homogenität kritisch ▪ Flexible Werkzeugsysteme
Grünbearbeitung 	<p>Die Form eines komplexen Bauteils wird möglichst konturnah vor dem Sintern hergestellt. Die Formgebung erfolgt mit den bekannten mechanischen Verfahren Drehen, Fräsen, Bohren. Die Homogenität von Pulver und Pressen (Grünling) hat direkten Qualitätseinfluss.</p> <p>Literatur: [KOL04, S. 432]</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einsatz von Werkzeugmaschinen ▪ Zerspanungsmechanismen unterschiedlich je Material und Charge ▪ Vergleichsweise hohes Zeitspannvolumen ▪ Bearbeitungs- und Spannkkräfte kritisch für Rissbildung ▪ Abplatzungen, Risse, Spontanversagen ▪ Mehrstufige Bearbeitung
Sintern 	<p>Beim Sintern bildet sich unter Einfluss hoher Temperatur aus dem vorgeformten Grünling das feste Bauteil. Durch Aktivierung der Teilchenoberflächen wachsen die Pulverteilchen zusammen und bilden ein dichtes Gefüge, sowie die Festigkeit und andere Eigenschaften aus.</p> <p>Literatur: [SAL07, S. 313ff.]</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Komplexe Verfahrenstechnik ▪ Chargenbetrieb ▪ Hohe Anforderungen an die Prozesse ▪ Spezifische Setzvorgänge auf Anlagen und Produkte ▪ Prozessschwankungen ▪ Hohe Individualität und wenig Stabilisierungsmöglichkeiten ▪ Chargenbesatz abhängig von Geometrie, Material, spezifischen Erfahrungen
Hartbearbeitung 	<p>In der Hartbearbeitung kommen verschiedene Schleif-, Hon-, Läpp- und Polierverfahren zum Einsatz. Die Hartbearbeitung dient zur Schaffung der endgültigen Bauteilgeometrie nach dem Sintern und fordert werkstoffspezifische Verfahren.</p> <p>Literatur: [ARZ14]; [SPU89]</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einsatz von Werkzeugmaschinen ▪ Variation durch Bauteilverzug beim Sintern ▪ Spezifische Verfahrensparameter, Schleifmittel und Werkzeuge ▪ Mehrstufige Bearbeitung ▪ Vergleichsweise niedriges Zeitspannvolumen (vgl. Metall) ▪ Lange und schwankende Bearbeitungszeiten

Verfahrenstechnische Produktionsverfahren bewirken eine stoffliche Umwandlung der bearbeiteten Materialien und verändern die Eingangsstoffe dabei substantiell im Gegensatz zu Verfahren der Fertigungstechnik [SCH08a]. In der beschriebenen Produktion von Sinterwerkstoffen erfolgen stoffliche Veränderungen durch das Pressen und Sintern. Diese Zuordnung ist jedoch in der Literatur nicht durchgängig beschrieben, wohingegen die Verfahren der Grün- und Hartbearbeitung eindeutig der Fertigungstechnik zugeordnet werden können.

Dennoch charakterisiert die vorgestellte Prozesskette einige Rahmenbedingungen, wie sie auch in der Prozessindustrie zu finden sind. Die sog. verfahrenstechnische Grundoperation (vgl. [SCH01]) des Sinterns läuft in einem Apparat⁹ ab, der wiederum in der Lage ist, verschiedene Prozessführungen mit den entsprechenden Haupteinflussgrößen (ebd.), wie z. B. Temperatur, Verweilzeit und Atmosphäre zu realisieren. Die Auswahl des Apparatetyps wird im Wesentlichen durch den Materialtyp, der Größe und das Gewicht des Sinterkörpers und der zu erreichenden Produktqualität bestimmt. Weiterhin bestehen im Stofffluss zwischen dem Pressen, der Grünbearbeitung und dem Sintern verkettete prozessuale Abhängigkeiten in Form von weiteren Haupteinflussgrößen. So spielen die erreichte Homogenität und Dichte der Pressung, die anschließenden Spann- und Schnittkräfte bei der spanenden Bearbeitung und das übergreifende Handling eine entscheidende Rolle, ob das Bauteil nach dem Sintern riss- und verzugsfrei bleibt [KOL04].

Die angewandte Verfahrenstechnik hat einen erheblichen Einfluss auf die Produkt- und Produktionstechnologie. Komplexe Produkte bestimmen beispielsweise die Anforderungen an den Sinterprozess. Ohne die entsprechenden Apparatetypen, den angepassten Prozessführungen mit den entsprechenden Haupteinflussgrößen lassen sich diese jedoch nicht erfolgreich in die bestehende Produktion umsetzen. Die Prozessführung ist letztlich entscheidend, ob die Materialeigenschaften und damit die Produktqualität sichergestellt werden kann. Die vorhandenen verfahrenstechnischen Anforderungen (vgl. Tabelle 2-2) erhöhen zusätzlich die Komplexität in der Produktion und stellen eine große Herausforderung für die PPS dar, welches im Folgekapitel weiter erläutert wird.

Produktionsprogramm

Die genannten Rahmenbedingungen der Produktvielfalt im Zusammenhang mit der Produktions- und Verfahrenstechnik bilden die Grundlage zu weiteren Analysen des Produktionsprogramms. Die Bauteile werden entsprechend der Arbeitspläne in definierten technologischen Reihenfolgen in den Arbeitsstationen bearbeitet. Durch das Vorliegen einer großen Anzahl verschiedener Produktarten mit unterschiedlichen Arbeitsplänen und stark variierenden Stückzahlen, ändern sich sowohl Materialbewegung als auch Maschinenbele-

⁹ Verfahrenstechnische Apparate sind hier im Wesentlichen diverse Sinteranlagen aus dem Bereich der Ofentechnik, die aufgrund der spezifischen Prozessführungen Sonderkonstruktionen im Maschinen- und Anlagenbau darstellen.

gungen stetig. Als Folge davon ändert sich das Produktionsprogramm kontinuierlich, wobei aufgrund von Nachfrageänderungen und strukturellen Änderungen der Produktionsprozesse, z. B. durch verfahrenstechnische Einflüssen, diese Änderungen im zeitlichen Ablauf äußerst dynamisch wirken (vgl. [ARN08, S. 109]). Die Abbildung 2-5 stellt diese Charakterisierung für die vorliegende Produktion von Sinterwerkstoffen dar.

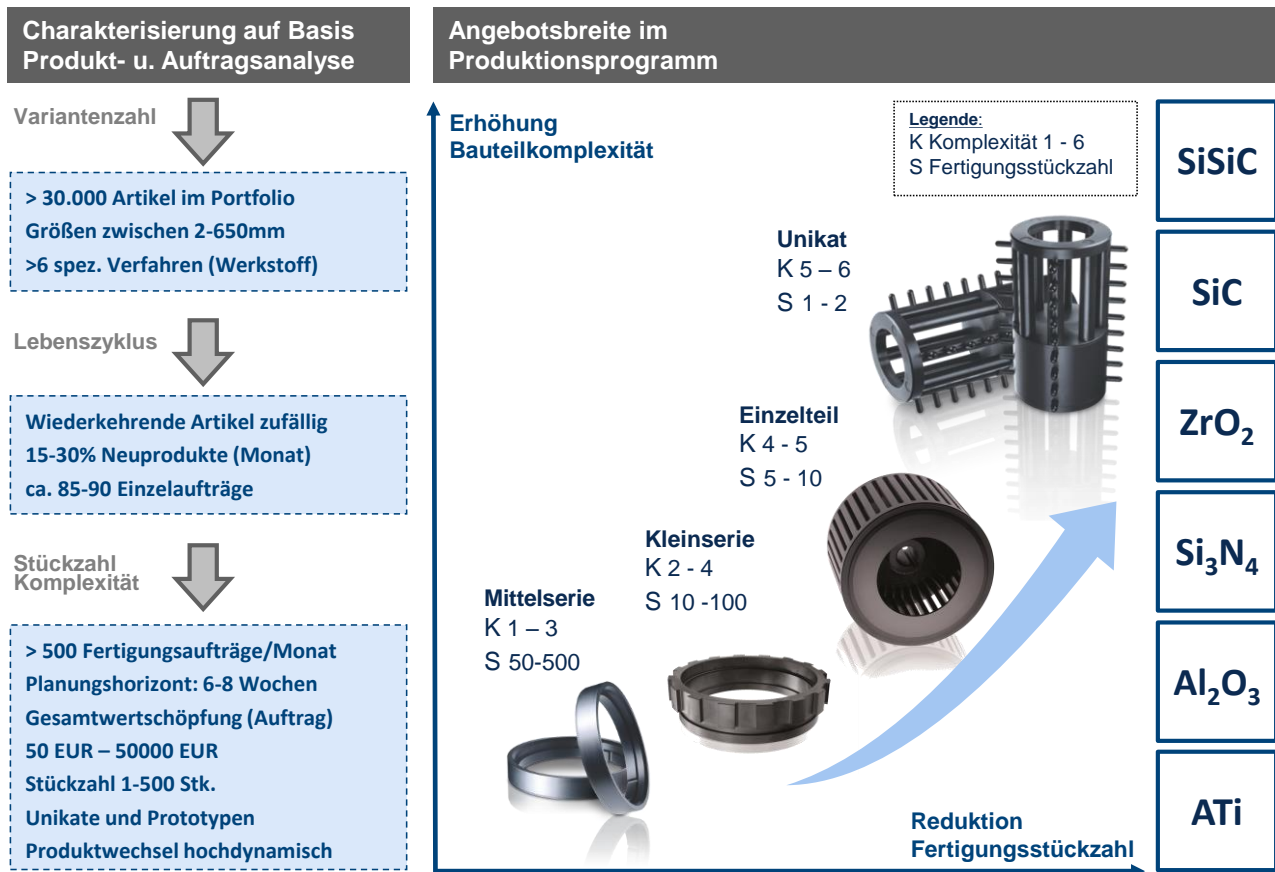


Abbildung 2-5: Charakterisierung des betrachteten Produktionsprogramms [BRA15]

Ein regelmäßiges und standardisiertes Produktionsprogramm mit kleinen Losgrößen, ist in der Auftragsfertigung (vgl. Tabelle 2-1) nicht erreichbar. Eine Charakterisierung dieser Anforderungen, die durch große Unschärfe geprägt sind, lässt sich durch die Variantenzahl, Lebenszyklen, Stückzahlverlauf, Produktwechsel, Angebotsbreiten und Lieferzeiten (vgl. Abbildung 2-5) erreichen [LIN06]. Neben der kurzfristigen Dynamik im Produktionsprogramm existieren auch langfristige durch Märkte und Technologien beeinflusste Veränderungen auf die Struktur des Produktionsprogramms, die im Rahmen dieser Arbeit nicht näher untersucht wurden.

2.1.3 Personal

Die individuellen und komplexen Produkte aus Sinterwerkstoffen stellen an die Produktion die Anforderung nach flexiblen und technologisch spezifischen Betriebsmitteln und auch nach hochqualifiziertem Personal. Betriebsmittel und Personal bilden hierbei nicht aus-

schließlich eine Kapazitätseinheit, sondern auch eine Prozess- und Technologieeinheit. In nahezu allen Verfahren ist das spezifische Wissen und ein hoher Erfahrungsgrad der Werker gefordert, um kritische Prozessparameter einhalten zu können. Beispielsweise ist in der Grünbearbeitung eine Erfahrung für den Verschleiß der Bearbeitungswerkzeuge¹⁰ gefordert. Ein zu spät erkannter Werkzeugverschleiß führt später zu Rissen im Bauteil. Diese Risse können oftmals erst nach dem nachfolgenden Sintern erkannt werden, wodurch dynamische Probleme zwischen den Arbeitssystemen entstehen. Beim Sinterprozess kommt der Erfahrung des Anlagenbedieners beim Betrieb der Öfen eine hohe Bedeutung zu. Technisch bedingte Ungleichmäßigkeiten der Anlagen, müssen durch das Personal erkannt und für den jeweiligen Prozess in Abhängigkeit der Bauteilgeometrie berücksichtigt werden. Technologisch besteht oft keine Lösungsalternative, die auftretenden Praxisprobleme in dieser Produktion zu lösen.

Der Mitarbeiter (MA) stellt bei ganzheitlichen Produktionssystemen einen wesentlichen Erfolgsfaktor des Unternehmens dar und wird nicht zu einem anonymen Kostenfaktor degradiert [BEC06]. Die Rolle des Mitarbeiters im Produktionssystem und auch vor dem Hintergrund einer verbesserten Produktionssteuerung stellt eine wichtige Einflussgröße für diese Arbeit dar. Dabei spielt insbesondere die bereits etablierte Vernetzung des Mitarbeiters mit den technischen Prozessen eine entscheidende Rolle. Schafft man es, Produktionsressourcen und -schritte nach situativen und kontextabhängigen Zielen besser zu steuern und die einzelnen Abläufe auch logistisch transparenter zu gestalten und zu vernetzen, kommt den Mitarbeitern verstärkt die entscheidende und qualitätssichernde Rolle zu (vgl. [KAG13]). Mitarbeiter der Abteilung PPS, Maschinenbediener und Werker sowie alle anderen Mitarbeiter, die an der Produktionsplanung und -steuerung teilnehmen, sind Akteure im PPS-System. Ihre wesentliche Aufgabe ist das Treffen von Entscheidungen [WIE05]. Sie haben damit einen hohen Einfluss auf die Wirksamkeit der Systeme und deren zugrunde liegenden Modellen, wozu sie als Bestandteil des Systems entsprechend befähigt werden müssen, bzw. die Funktionalität des Systems selbst befähigen. Es ist bekannt, dass Unternehmen durch die gezielte Nutzung des Know-hows der MA die Produktivität steigern und Wettbewerbsvorteile generieren können. Eine wichtige Rolle spielt dabei die Befähigung der lokalen Führungsebene in den Elementen der schlanken Produktion [BRA09]. Grundlage hierzu ist die Vorgabe eines Regelwerkes, um den Mitarbeitern Hilfestellung zu geben, gewisse Entscheidungen im vorhandenen System zielorientiert zu treffen.

¹⁰ Der Verschleiß der Werkzeuge ist aufgrund der hohen Härte der Materialien, schwankender Qualität der Werkzeuge, der Vielfalt der Bearbeitungsaufgaben und weiterer dynamischer Parameter prozesstechnisch zu komplex, um fundierte methodische Standards zu schaffen.

2.1.4 Organisationsform der Einzelteil- und Kleinserienfertigung

Eine entscheidende Einflussgröße auf die Organisationsform der Fertigung hat der Stückzahlcharakter. Die hier vorliegende Kleinserienfertigung stellt eine Fertigungsart dar, die sich durch eine vergleichsweise geringe durchschnittliche Losgröße in Verbindung mit einer geringen durchschnittlichen Wiederholhäufigkeit der Erzeugnisse auszeichnet, wobei i. d. R. kundenauftragsbezogen gefertigt wird [LÖD08b, S. 97]. Nach LUCZAK und EVERSHEIM lassen sich die Fertigungsarten anhand der Gegenüberstellung von Losgröße und Wiederholungshäufigkeit vergleichen. Die in Abbildung 2-6 genannten Grenzwerte dienen hierbei als Richtwerte zur Einordnung [LUC01].

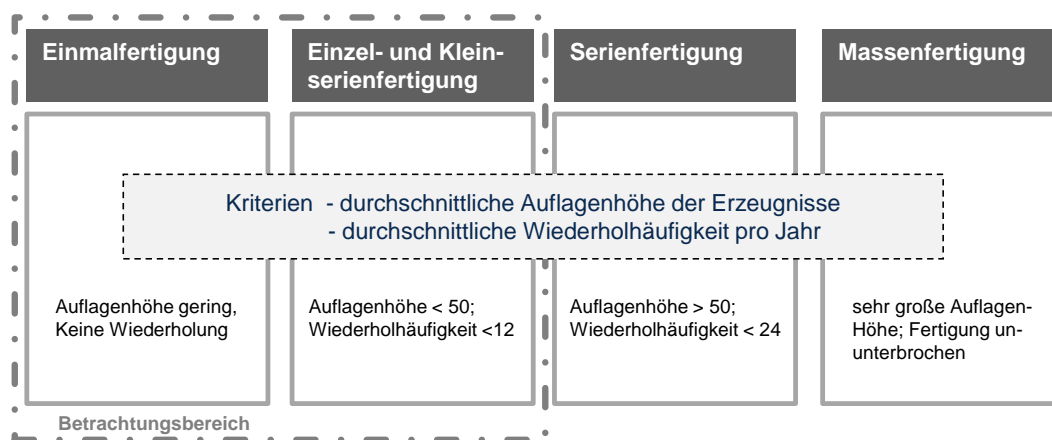


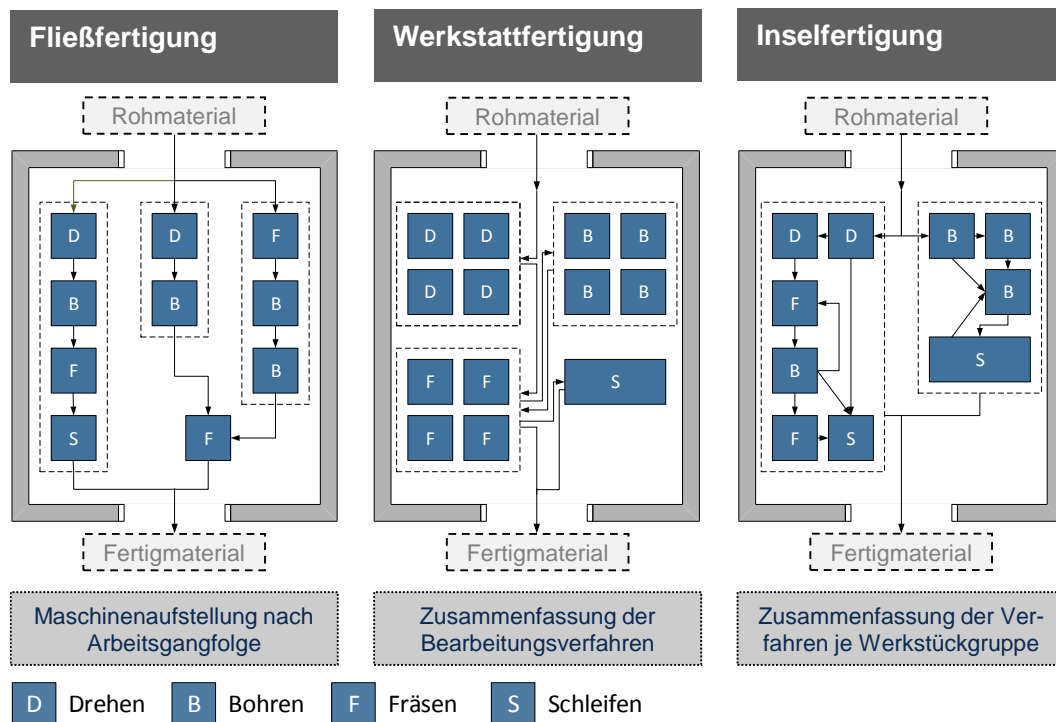
Abbildung 2-6: Vergleich der Fertigungsarten [LÖD08b]

Weitere Merkmale, die neben der Fertigungsart zur Klassifizierung einer Fertigung genutzt werden können und nachfolgend betrachtet werden, sind das Fertigungsprinzip, der Teilefluss, die Variantenanzahl, die Materialflusskomplexität¹¹ sowie die Kunden- und Kapazitätsbedarfsschwankungen. [DEU11, S. 13].

Fertigungsprinzip

Nach WIENDAHL klassifiziert sich das Fertigungsprinzip durch drei Faktoren. Das sind einerseits die räumliche Anordnung der Betriebsmittel und der Arbeitsplätze und andererseits der Produktionsablauf der zu fertigenden Teile sowie die Einbindung der Mitarbeiter. Unterschieden wird hierbei zwischen dem Werkstatt-, Fließ-, Insel-, Baustellen- und Werkbankprinzip. [WIE14b] Das Fertigungsprinzip kennzeichnet auch die Transportbeziehungen und die organisatorische Verantwortung über die Ressourcen und ihre Beziehungen [BOR09]. Die Abbildung 2-7 stellt dabei die in dieser Arbeit explizit betrachteten Fertigungsprinzipien vereinfacht gegenüber:

¹¹ vgl. Anhang A

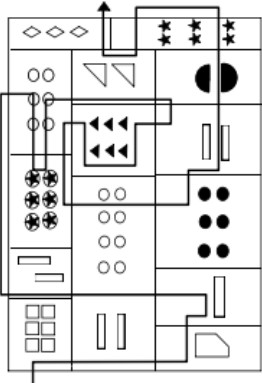
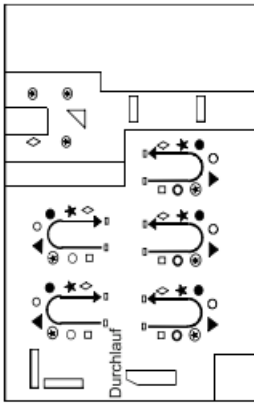


**Abbildung 2-7: Organisationsschema unterschiedlicher Fertigungsprinzipien
(in Anlehnung an [EVE97])**

Beim Werkstattprinzip, das in der Literatur auch als Verrichtungsprinzip bezeichnet wird, werden gleichartige Arbeitssysteme räumlich zu Werkstätten zusammengefasst und die Werkstücke von Werkstatt zu Werkstatt transportiert. Beim Fließprinzip werden die Maschinen und Arbeitsplätze entsprechend des Materialflusses der Werkstücke und im Allgemeinen in einer getakteten Bearbeitung an das nächste Arbeitssystem weitergegeben. Das Inselprinzip wird zwischen Werkstatt- und Fließprinzip eingeordnet. Zwar werden die Arbeitssysteme ebenfalls materialflussorientiert angeordnet, allerdings zeichnen sich Fertigungsinseln verglichen mit Fließfertigungssystemen lediglich durch die Zusammenfassung von notwendigen Maschinen, einen niedrigeren Automatisierungsgrad, manuellen Transport und eine höhere Kapazitätsflexibilität aus. (vgl. [WIE14b])

Die Beschreibung der Inselfertigung zeigt, dass die Umstellung einer **verrichtungsorientierten Werkstattfertigung** zu einer **objektorientierten Inselfertigung** die Rüst- und Transportzeiten verkürzt. Kürzere Rüst- und Transportzeiten ermöglichen kleinere Produktions- bzw. Transportlosgrößen, die sich wiederum positiv auf die Zwischenlagerbestände und die Auftragsdurchlaufzeiten auswirken. [ARN08, S. 154] Die Inselproduktion bietet dennoch nicht nur Vorteile. In der Tabelle 2-3 werden deshalb die wesentlichen Rahmenbedingungen sowie Vor- und Nachteile der beiden Fertigungsprinzipien gegenübergestellt.

Tabelle 2-3: Vor- und Nachteile der Werkstatt- und Inselfertigung

Fertigungsprinzip	Vorteile	Nachteile
Werkstattfertigung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Flexible Anpassung an Werkstücke und Bearbeitungsfolgen ▪ Verfahrens- und Produktionstechnik flexibel und schnell Integration neuer Technologien ▪ Teilefertigung in kleinen Serien bzw. Losen ▪ Hohe Elastizität (Skaleneffekt) ▪ Konzentration von technologischen Wissen ▪ Vergleichsweise hohe Maschinenauslastung ▪ Einfache Verfahrensintegration 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lange Durchlaufzeiten primär durch Warte- und Transportzeiten ▪ Bearbeitung per Los ▪ Hoher Koordinationsaufwand ▪ Warteschlangen vor den Prozessen schlecht vorhersagbar (Auftragspuffer) ▪ Auslastungsorientierte Planung mit vielen Aufträgen ▪ Unklare Zuständigkeiten bei Qualität und Termine ▪ Ungerichteter Materialfluss
Ordnungsprinzip: Verrichtungs-/funktionsorientiert		
Inselfertigung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Organisatorische, planerische und kontrollierende Funktion in Selbstverantwortung ▪ Möglichkeit zur Materialanforderung und Feinterminierung ▪ Räumliche Konzentration der Arbeitsmittel ▪ Kürzere Durchlaufzeiten und Bestände der Produkte ▪ Prozesskettenoptimierung ▪ One-Piece-Flow (Stückweise Fertigung)¹² ▪ Tendenziell einfachere Steuerungsmöglichkeiten 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fertigung nur ähnlicher Teilegruppen ▪ Geringere Flexibilität im Produktionsprogramm ▪ Unterschiedliche Bearbeitungszeiten ▪ Eingeschränkte Taktung ▪ Gefahr von Leerkosten ▪ Strukturanpassungen bei Produkt- und Mengenänderung ▪ Kapazitätsteilung
Ordnungsprinzip: Objekt-/produktorientiert		
Literatur: [SCH14, S. 371ff.]; [WIE14a, S. 92ff.]; [ARN09, S. 124ff.]; [WIE14b, S. 43ff.]; [SCH11, S. 330ff.]; [HIR00, S. 24ff.]		

Aus der Gegenüberstellung ist ersichtlich, dass eine produktorientierte Organisation durch die räumliche und organisatorische Komprimierung der Prozesskette deutliche Vorteile in Bezug auf Durchlaufzeit und Steuerung mit sich bringt. In vielen Konzepten zur wertstromorientierten Optimierung der Produktion bilden Produktionsinseln ein wichtiges Element der organisatorischen und produktionslogistischen Neugestaltung des Betriebes [ARN09]. Bei technologisch anspruchsvollen Tätigkeiten und einer mehrstufig verketteten Verfahrenstechnik (vgl. 2.1.2) bietet allerdings nur die verrichtungsorientierte Organisation die

¹² Einzelstückfluss (engl. „one-piece flow“) ist ein Konzept, in dem die Artikel direkt von einem Arbeitsgang zum nächsten verarbeitet werden, eine Einheit einzeln, d.h. ohne zwischen zwei Arbeitsgängen die anderen Einheiten des Loses jeweils abwarten zu müssen. [SCH11, S. 332]

geforderte Flexibilität. Folglich ist die vorliegende Kleinserienfertigung im Ausgangszustand als verrichtungsorientierte Werkstattfertigung organisiert. Häufig tritt dieses Fertigungsprinzip aber auch in der kundenauftragsbezogenen Einzel- und Kleinserienfertigung im Maschinen- und Anlagenbau auf [PET09]. Die Sinterbauteile werden anhand der in ihren Arbeitsplänen definierten technologischen Reihenfolgen zu den einzelnen Werkstätten transportiert und dort bearbeitet. Die Arbeitssysteme müssen in der Lage sein, ein breites Spektrum von Operationen, entsprechend des vorgestellten Produktionsprogrammes, durchzuführen. Dabei stellen die Hauptverfahren (vgl. Abbildung 2-4) die übergeordnete Organisationsebene dar, die ebenfalls nach dem Verrichtungsprinzip organisiert ist. Die einzelnen Hauptverfahren sind räumlich getrennt und die Produkte durchlaufen untergeordnet die Werkstätten, die dem jeweiligen Hauptverfahren zugeordnet werden. Beispielsweise werden der Grünbearbeitung die Dreherei, Fräserteile und ein manueller Bearbeitungsschritt zugeordnet. Die Organisation der Produktion nach dem Werkstattprinzip in der Praxis sowie der übergeordnete Materialfluss ist Abbildung 2-8 zu entnehmen.

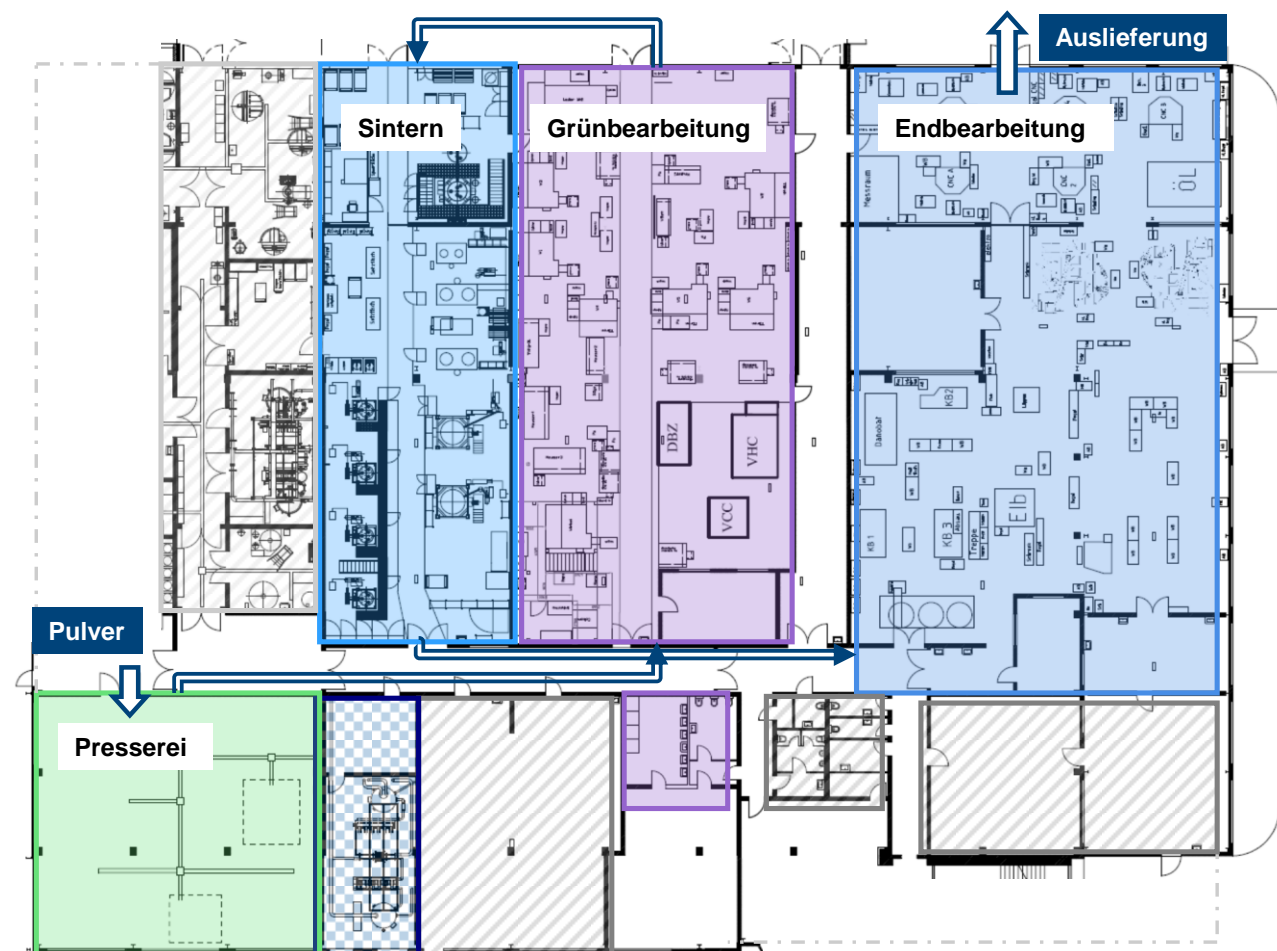


Abbildung 2-8: Ausgangssituation der Organisation nach dem Verrichtungsprinzip im betrachteten Beispielunternehmen

Das Fabriklayout visualisiert in den einzelnen Bereichen der Produktion die Stellplätze der Maschinen und Anlagen. Die Wertschöpfungskette lässt sich dadurch vollständig abbilden und beinhaltet etwa 100 Maschinen, Anlagen oder manuelle Arbeitsplätze. In der beschriebenen funktionsorientierten Produktion von Sinterteilen nach dem Werkstattprinzip sind die Bearbeitungsschritte, wie in Abbildung 2-8 zu entnehmen ist, räumlich voneinander getrennt. Es findet in der Regel ein losweiser Transport statt. Beim Sinterprozess, der als Chargenprozess arbeitet, werden parallel mehrere Lose in einer Anlage produziert. Aufgrund der hohen Variantenvielfalt, einer geringen Wiederholhäufigkeit des Auftragsflusses und durch das beschriebene Fertigungsprinzip entsteht eine hohe Materialflusskomplexität. Rückflüsse, hervorgerufen beispielsweise durch Spontanausfall der sprödharten Sinterwerkstoffe, können dabei ebenso entstehen.

Kapazitätsbedarfsschwankung

Viele produzierende Unternehmen stehen heute in der Regel einer schwankenden Kundennachfrage gegenüber. Damit geht ein ungleichmäßiger Bedarf an Kapazitäten in der Produktion einher [ABE11]. Diese Kapazitäten schnell an die schwankenden Bedarfe anzupassen, wird in der Literatur als „Kapazitätsflexibilität“ bezeichnet und hat erheblichen Einfluss auf die Kapazitätsplanung und damit auf die Fertigungssteuerung [LÖD08b]. Insbesondere bei der beschriebenen verrichtungsorientierten Produktion mit Produkten, die durch ihre Komplexität Kapazitäten stark unterschiedlich belasten, sind Kapazitätsbedarfsschwankungen die Regel. Einen Überblick über diese Schwankungen aus der Gesamtsicht der vorgestellten Produktion verschafft die Einlastungskurve in Abbildung 2-9.

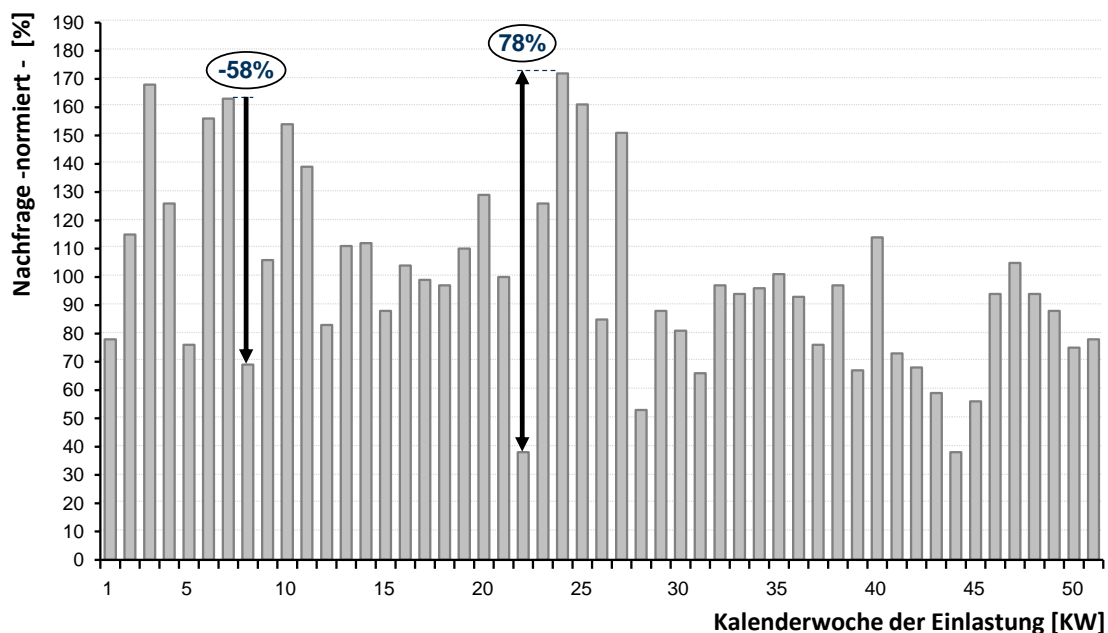


Abbildung 2-9: Beispiel der Kapazitätsbedarfsschwankung eines Jahres

Anhand einer realen Einlastungskurve aus dem Kalenderjahr 2013 sind die Schwankungen aufgrund der Nachfrage, die zu einer konkreten Auftragsfreigabe führt, normalisiert dargestellt. Die starken Veränderungen von bis zu 60 Prozent pro Woche und maximalen Schwankungen von bis zu 78 Prozent stellen neben dem Produktspektrum hohe Anforderungen an die Flexibilität des Produktionssystems. Folglich sind die einzelnen Arbeitssysteme¹³ gefordert, eine hohe Kapazitätsflexibilität zu ermöglichen um auf dynamische Veränderungen des Produktionsprogramms kurzfristig zu reagieren.

Klassifizierung

Innerhalb des Kapitels 2.1 wurden bisher die wesentlichen Rahmenbedingungen der **vorliegenden Einzel- und Kleinserienproduktion** vorgestellt, die die hier betrachtete Organisation der Produktion beeinflussen. Diese Rahmenbedingungen bestimmen maßgeblich die Dimensionierung, Anordnung und Vernetzung innerhalb der Produktion und sind damit wichtige Grundlagen der Fertigungssteuerung. Die Tabelle 2-4 fasst die innerhalb dieses Kapitels vorgestellten Merkmale in Form einer morphologischen Klassifizierung zusammen.

Tabelle 2-4: Zusammenfassung der Merkmale und Klassifizierung der Produktion¹⁴

Merkmal	Ausprägung				
Fertigungsprinzip	Baustellenprinzip	Werkbankprinzip	Werkstattprinzip	Inselprinzip	Fließprinzip
Fertigungsart	Einmalfertigung	Einzel- und Kleinserienfertigung		Serienfertigung	Massenfertigung
Teilefluss	One-Piece-Flow	Losweiser Transport		Überlappende Fertigung	Chargenfertigung
Varianz des Produktes	Erzeugnisse nach Kundenspezifikation	Typisierte Erzeugnisse mit kundenspezifischen Varianten		Standarderzeugnisse mit Varianten	Standarderzeugnisse ohne Varianten
Variantenanzahl	gering		mittel		hoch
Materialflusskomplexität	Linearer Materialfluss		Komplexer Materialfluss ohne Rückflüsse		Komplexer Materialfluss mit Rückflüssen
Kapazitätsbedarfschwankungen	gering		mittel		hoch
Materialsteuerung	Bedarfsorientiert auf Erzeugnisebene	Teilweise bedarfsorientiert auf Komponentenebene		Erwartungsorientiert auf Komponentenebene	Verbrauchsorientiert auf Erzeugnisebene

Bisher wird gezeigt, dass eine besondere Herausforderung aufgrund der verfahrenstechnischen Verkettung der Werkstattfertigung bei gleichzeitig hoher Produktvarianz entsteht.

¹³ Unter Arbeitssystemen werden hier die Arbeitsaufgabe, der Arbeitsablauf, Umwelteinflüsse, sowie die Kapazitätseinheiten von Personal und Betriebsmittel zusammengefasst.

¹⁴ Darstellungsweise in Anlehnung an [LÖD08a]

Eine auf kundenindividuelle Produkte und Auftragsfertigung fokussierte Marktausrichtung in einer Branche, die Schlüsselkomponenten hochflexibel, schnell und innovativ liefert, trägt wesentlich zur Komplexität bei. Ähnliche Funktionen der Produktion werden zusammengefasst, um flexibel reagieren zu können und gleichzeitig eine hohe Auslastung zu erreichen. Für diese Umsetzung ist neben einer entsprechend organisierten Produktion auch ein Auftragsabwicklungsprozess notwendig, der in der Lage ist, diese Komplexität zu beherrschen um die geforderten logistischen Verbesserungen zu erzielen.

2.2 Ausgangssituation in der Produktionssteuerung

Auf Basis der beschriebenen Rahmenbedingungen der Produktion wird in Kapitel 2.2 die Produktionssteuerung betrachtet. Der Auftragsabwicklungsprozess und die Wertschöpfung des Betrachtungsbereiches sind dabei wichtige Voraussetzungen um die Herausforderungen der Produktionssteuerung in diesem Kapitel zu erkennen, Problembereiche einzugrenzen und daraus Handlungsfelder abzuleiten. Dabei werden die wesentlichen Schwierigkeiten, die in der Praxis auftreten, herausgestellt.

2.2.1 Herausforderungen der Auftragsabwicklung

Die einleitend beschriebene Zielsetzung nach einer deutlichen Reduzierung der Durchlaufzeiten bei gleichzeitiger Erhöhung der Fertigungsliefertreue stellt die zentrale Herausforderung für die hier beschriebene vielschichtige Produktion dar. Die Auftragsabwicklung ist dabei aufgefordert, neben dieser logistischen Zielerreichung, kundenindividuelle Produkte mit breiten technischen Anforderungen effizient umzusetzen.

Die wesentliche Schnittstelle stellt die PPS dar, um diese Geschwindigkeitssteigerungen in der Umsetzung des Produktionsprogramms zu erreichen und Wissen zu bündeln. Dabei beinhaltet das in Abschnitt 2.1 vorgestellte Produktionsprogramm kontinuierlich bekannte und neue Produkte, die kurzfristig in der Produktion umgesetzt werden müssen. Aufgaben der Planung und Steuerung gehen dabei vermehrt ineinander über und sind nicht starr zu trennen (vgl. [AUE11]). Diese Arbeit fokussiert daher die Aufgabe der **Produktionssteuerung**, die Vorgaben der **Produktionsplanung umzusetzen**. Dennoch besteht die Herausforderung nicht alleine darin, den Steuerungsprozess zu verbessern, sondern es treten in der Praxis weitere Einflüsse auf, die als Herausforderung berücksichtigt werden müssen:

„Eine funktionierende Fertigungssteuerung ist Grundvoraussetzung, um die theoretischen Vorteile einer fortgeschrittenen Produktionsplanung auch praktisch zu erschließen.“ [LÖD08b, S. 25]

- PPS bildet ein synchrones Bindeglied in der Auftragsabwicklung zwischen Kunden und Produktion; dabei ist Planung und Steuerung zeitlich und inhaltlich verknüpft.
- Daten der Produktionsplanung sind oft unausgereift, da eine geringe Wiederholhäufigkeit und ein schwankender Anteil Neuprodukte parallel vorliegen.
- Das Produktionsprogramm wird nicht vorgegeben, sondern entsteht bei der Auftrags-erzeugung kontinuierlich (keine theoretische Planung).
- Zeithorizont für die gesamte Auftragsplanung beträgt weniger als 6 Wochen.
- Beziehungsvielfalt an Produkten und Ressourcen ist planungstechnisch intransparent. Eine schlechte Stamm- und Rückmeldedatenqualität wird gefördert.
- Während 90 Prozent der Abwicklungszeit ist der Auftrag freigegeben und wird gesteuert bzw. überwacht. (Auftragserzeugung entspricht meist Auftragsfreigabe).

Ein Modell zur Erklärung der Prozesse in der Produktionssteuerung ist das Modell von LÖDDING (vgl. Abbildung 2-10).

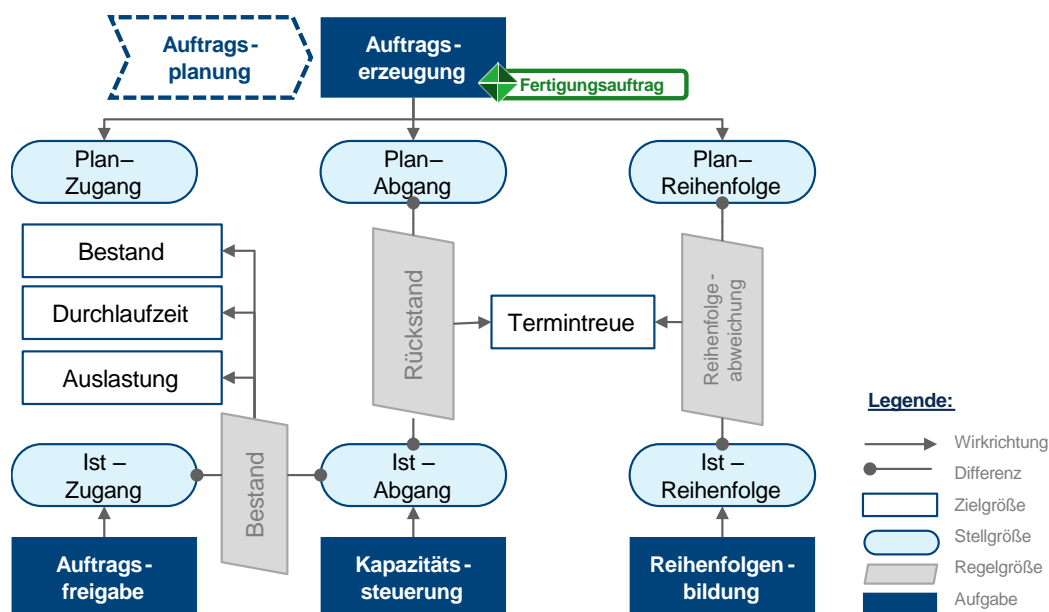


Abbildung 2-10: Modell der Produktionssteuerung nach LÖDDING [LÖD08b]

Obwohl die Fertigungssteuerung nur einen Teilaspekt von bekannten PPS-Modellen (vgl. [SCH12b, S. 21]) abdeckt, ist der Einfluss auf die logistische Zielerreichung durch die Umsetzung der Planung in die Produktion hoch. Die vorgestellten **Auftragsfertiger** generieren Fertigungsaufträge auf Basis von eingehenden Kundenaufträgen. Der IST-Zugang an Aufträgen wird durch die Auftragsfreigabe bestimmt und legt somit den Zeitpunkt der Rei-

henfolgenbildung fest. Die wesentlichen Aufgaben der Produktionssteuerung¹⁵ (vgl. [LÖD08b]; [OST12]; [BOR09]) sind dabei:

- **Auftragserzeugung:** Planwerte für Zugang, Abgang und Reihenfolge
- **Auftragsfreigabe:** Zeitpunkt und Reihenfolge der Einlastung sowie IST-Zugang
- **Kapazitätssteuerung:** Kapazitätsangebot gesamt, Einfluss auf IST-Abgang
- **Reihenfolgebildung:** IST-Reihenfolge der Aufträge an einem Arbeitssystem

Durch die vielfältigen Materialflussbeziehungen, organisatorische Schnittstellen, verfahrenstechnische Anforderungen und die beschriebene funktionsorientierte Fabrikstruktur entsteht ein Netzwerk an Arbeitssystemen. Die Literatur beschreibt bereits die hohe Herausforderung der Auftragsfreigabe und Kapazitätssteuerung für die logistische Zielerreichung in der **Werkstattsteuerung**¹⁶. Die Kapazitätssteuerung wirkt als einzige Steuerungsaufgabe auf alle vier Zielgrößen (vgl. Abbildung 2-10). Bei der Konfiguration eines Werkstattsteuerungsverfahrens ist deshalb die abgestimmte Konfiguration von Auftragsfreigabe und Kapazitätssteuerung besonders bedeutend [NYH06].

Die Abbildung 2-11 stellt, neben den bekannten Aufgaben, die Herausforderungen der Praxis gegenüber.

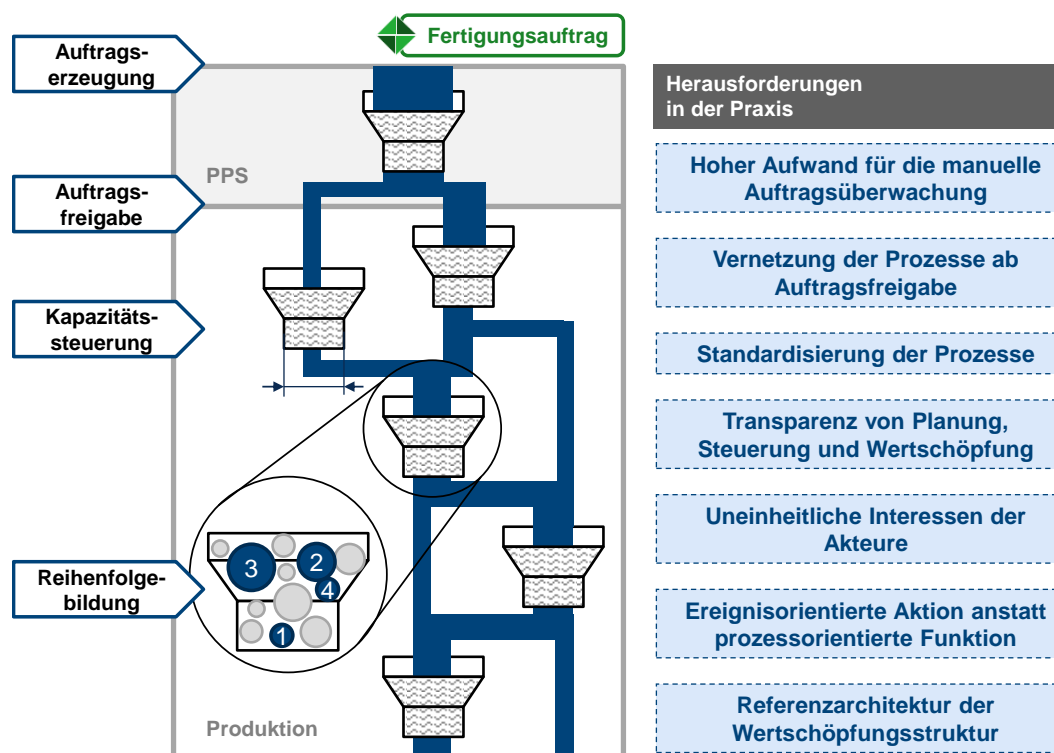


Abbildung 2-11: Aufgaben der Produktionssteuerung [WIE14b] und deren Herausforderung

¹⁵ Auf die Verfahren im Einzelnen wird in Kapitel 3 näher eingegangen.

¹⁶ Die Werkstattsteuerung ist Teil der PPS und übernimmt bei der Eigenfertigung die Auftragsdurchführung i. d. R. in einer Werkstattfertigung [HAC89]. (vgl. Kapitel 3)

Die wesentlichen Defizite entstehen durch eine Planungsmethode vor der Auftragsfreigabe, die die aktuelle Situation von Reihenfolgen und Kapazitäten nicht ausreichend berücksichtigt, sowie eine für sich selbst betrachtete zu komplexe Kapazitätssteuerung und Reihenfolgenbildung. Folglich kommt es während der Umsetzung der Aufträge vermehrt zur **Auftragsüberwachung**. Der Fokus der Steuerer verändert sich dahingehend, den kompletten Durchlauf eines Auftrags in der Produktion von der Freigabe bis zur Fertigstellung zu überwachen [MER96]. Hierbei werden im Wesentlichen Störungen und unvorhergesehene Ereignisse identifiziert und kurzfristige Gegenmaßnahmen eingeleitet [ENG15]. Transparenz über den Fortschritt der Aufträge durch einen regelmäßigen Abgleich von Planung und Ist-Informationen ist theoretisch dazu notwendig, aber in der Praxis dieser Ausgangssituation nicht stabil erreichbar.

Diese **mangelnde Transparenz** in der Auftragsabwicklung über mehrere Hierarchieebenen hinweg, führt zu einer komplexen Dynamik in der Auftragsdurchführung. Reihenfolgen und Kapazitätsbeanspruchung ändern sich kontinuierlich und das vielschichtige Produktionsprogramm wird mit dem hohen Aufwand der Auftragsüberwachung abgewickelt. Die Herausforderung besteht darin, die vorgestellte Produktion zu systematisieren und dann mit einer umfassenden Methodik richtig zu planen und zu steuern. Zur Unterstützung bei diesen Aufgaben werden traditionelle IT-Systeme genutzt, die diesen hier vorliegenden speziellen dynamischen Anforderungen jedoch nicht ausreichend gerecht werden. Eine Verbesserung ist nur durch ein theoretisch erarbeitetes vereinfachtes Gesamtmodell der Wertschöpfungsprozesse zwischen der Produktion, dem IT-System und dem Personal erreichbar. Als Basis für die Modellierung dient dabei der Wertstrom.

2.2.2 Turbulenzen im Wertstrom

Der Wertstrom betrachtet alle Tätigkeiten, die in einer bestimmten Abfolge für die Herstellung eines Produktes aus einem Rohmaterial bis zur Lieferung an den Kunden notwendig sind. Tätigkeiten und Operationen entlang der Wertschöpfungskette können dabei wertschöpfend bzw. nicht wertschöpfend sein. Dies umfasst folglich neben den Bearbeitungsoperationen, den Materialtransport, die Produktionsplanung und -steuerung sowie die Kommunikation entlang der Lieferkette. Der Wertstrom bildet so ein Netzwerk aus Prozessen und Operationen, durch das sich Material und Informationen zeitlich und räumlich bewegen. [ERL10]

Auf Grundlage der Fabrikorganisation (vgl. Abbildung 2-8) wird in Abbildung 2-12 der reale Wertstrom für den Betrachtungszeitraum einer Kalenderwoche qualitativ dargestellt. Diese Visualisierungsform wurde gewählt, um die Dynamik in der Prozesskette und den Arbeitssystemen darzustellen, sowie den Eingriff der PPS auf die Wertströme zu beschreiben. Die Abbildung zeigt den Auftragsstrom der verrichtungsorientierten Bearbeitung durch alle Bereiche. Es wird deutlich, dass bei der Auftragsfertigung ein

komplexer Ausgangszustand für die Produktionssteuerung entsteht. Vergangenheitsorientierte Kapazitätsplanung auf Basis der Ebene der einzelnen Arbeitssysteme und Rückwärtsterminierung, die vom Kundenkopplungspunkt ausgeht, begünstigen das.

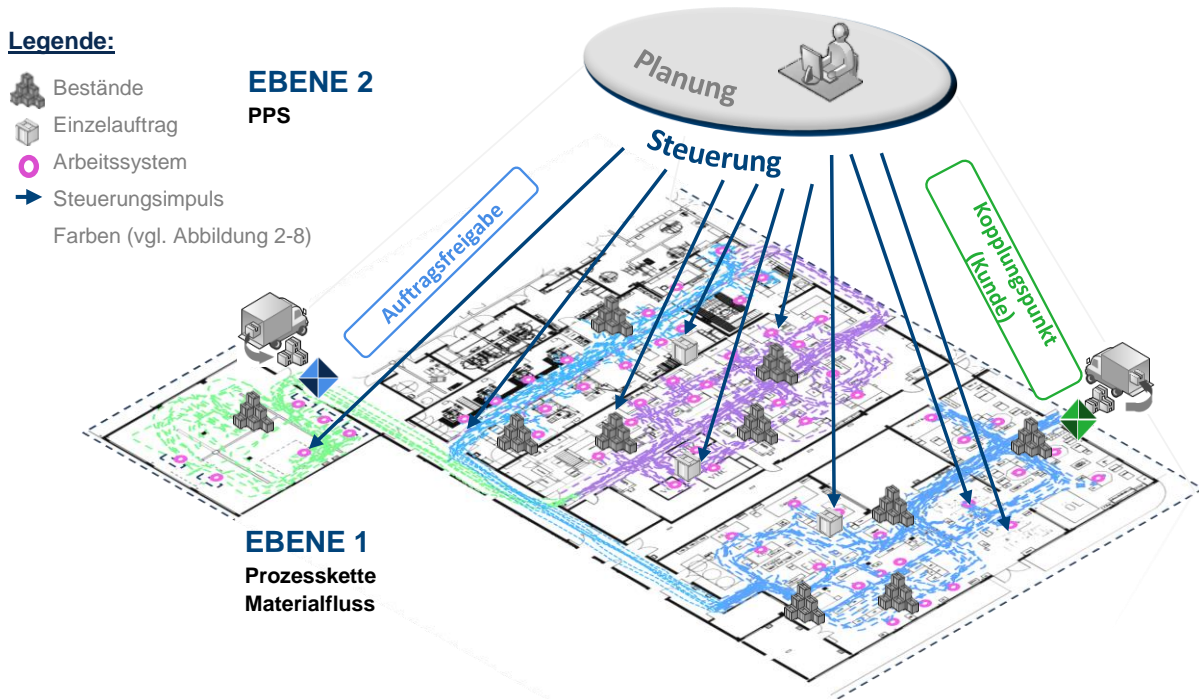


Abbildung 2-12: Qualitative Visualisierung des Wertstroms im Ausgangszustand

Komplexe Werkstattfertigungen mit mehrstufigen Fertigungsprozessen und einer hohen organisatorischen Komplexität¹⁷ existieren auch in der Kleinserienproduktion von Metallkomponenten [TÜC11]. Durch die mehrstufige Verfahrenstechnik der Sinterbauteile, Risiken des spontanen Qualitätsausfalls und signifikanter Unterschiede der Bearbeitungszeiten entsteht demgegenüber eine gesteigerte Prozesskomplexität. Die prozessuale Verketten der Verfahren führt zu übergreifenden Steuerungsproblemen, die vorhandene Reihenfolge- und Kapazitätsprobleme des einzelnen Prozessschrittes zusätzlich überlagern. In der Chargenfertigung „Sintern“, zwischen den Werkstattfertigungen „Grün- und Hartbearbeitung“, entstehen beispielsweise massive Terminschwankungen bei vor- oder nachgelagerten Störungsereignissen. Eine zu heterogene Anlagenbelegung oder einzelne unzureichend geplante Bearbeitungsumfänge sind Ursachen dafür.

Daraus entwickeln sich massive bereichsübergreifende Probleme. Umliegende Arbeitssysteme schieben Aufträge weiter und es entsteht dabei ein hoher Bestand von Einzelaufträgen, die sich an **vielen Orten der Prozesskette** aufstauen (vgl. Abbildung 2-12) und Engpässe bilden. Der Wertstrom ist damit weder im Shop-Floor noch innerhalb des IT-

¹⁷ Bearbeitung durch eine hohe Vielfalt von Werkzeugmaschinen mit unterschiedlichen Bearbeitungszeiten und mehr als 100 Einzelmaschinen zur Belegung mit Aufträgen.

Systems ein transparentes Hilfsmittel. Die zentral organisierte Steuerung greift überwiegend ein und beeinflusst über Steuerungsimpulse ad-hoc die Reihenfolgenbildung oder Kapazitätsänderung an Arbeitssystemen bzw. unmittelbar Einzelaufträge. Die Impulse erfolgen nicht ganzheitlich, bewirken Turbulenzen und erzeugen verkettete und sich dynamisch verändernde Engpässe. Einerseits können Liefertermine nicht eingehalten werden und die Durchlaufzeiten für viele Produkte verlängern sich. BORNHÄUSER und WIENDAHL unterscheiden drei Arten von Engpässen. Für diese Arbeit bilden die wechselnden Engpässe die Grundlage und daher werden stabile und stetige Engpässe nicht näher betrachtet [WIE02, BOR09]. Die Abbildung 2-13 charakterisiert die beschriebenen Auswirkungen der Turbulenzen des Wertstroms.

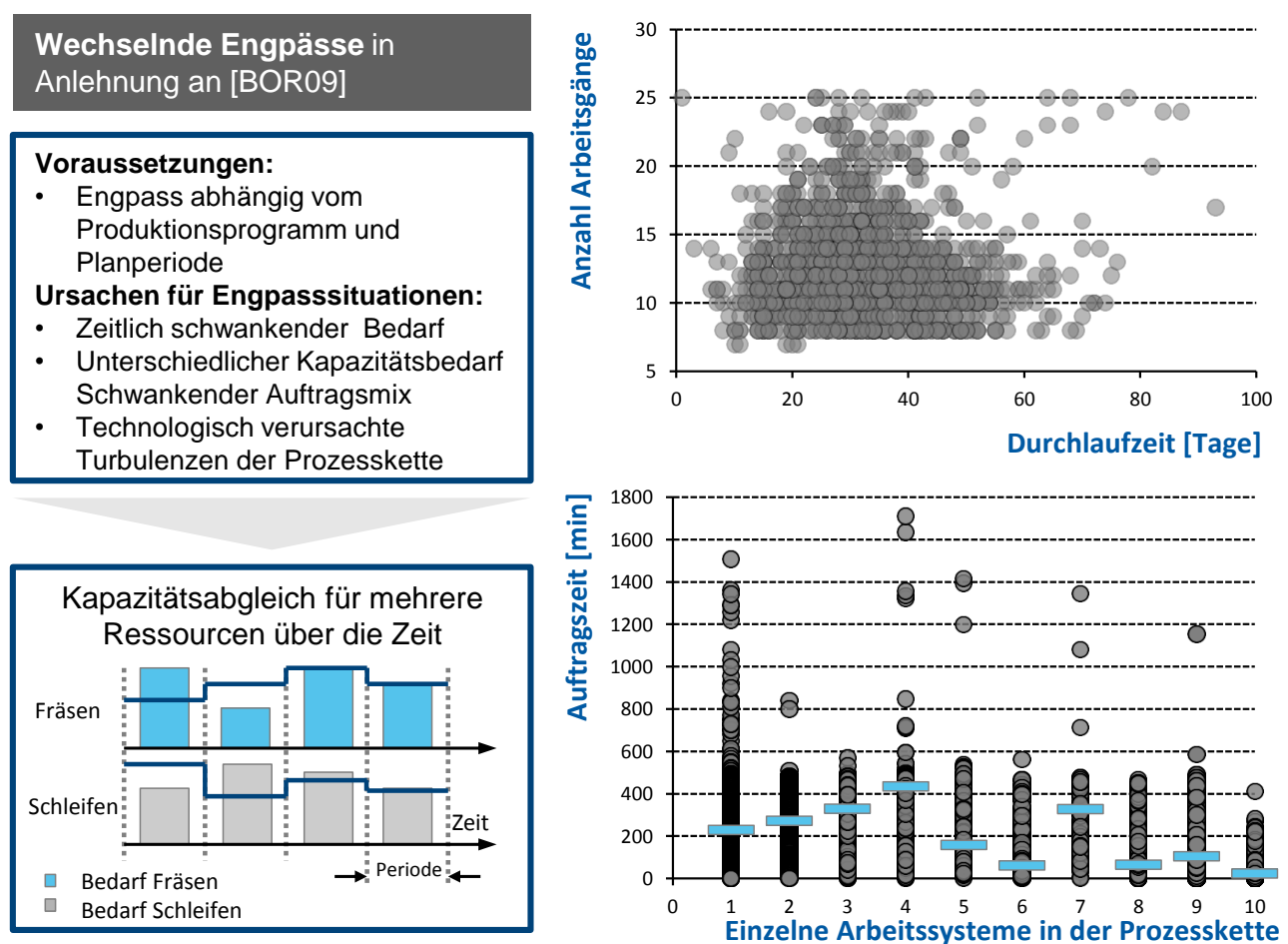


Abbildung 2-13: Charakterisierung der Engpässe, Durchlaufzeiten und Prozessnivellierung

Die Abbildung enthält exemplarische Kenngrößen der Beispielproduktion aus dem Jahr 2012, die analytisch durch umfangreiche Wertstromuntersuchungen ermittelt wurden. Teilergebnisse der IST-Wert-Analyse wurden in einer Diplomarbeit bereits genannt [HÄF13].

Die **detaillierte Betrachtung der Wertströme** schafft die Möglichkeit verschiedene Wirkmechanismen in den unterschiedlichen Werkstattbereichen aus mehreren Betrachtungsebenen heraus zu verstehen. Sie ist deshalb eine **wichtige Grundlage für diese Arbeit**,

um die komplexe Ausgangssituation zu visualisieren und weiterführend methodisch zu untersuchen. Aus diesem Grund kann die Konzentration auf den Wertstrom auch bei funktionsorientierten Produktionen als Schlüssel zum Erfolg gelten, um Prozesstransparenz und die Realitätstreue der zeitlichen Abläufe als Grundlage der konzeptionellen Modellbildung zu gewährleisten. Daraus ergibt sich die Möglichkeit den Grundkonflikt zwischen hoher Kapazitätsauslastung der heterogenen Anlagenstruktur und gleichzeitig minimierter Warte- und Transportzeiten zwischen der Bearbeitung zu erkennen und methodisch weiter zu abstrahieren.

2.2.3 Defizite der Fertigungssteuerung

Das bisherige Konzept der PPS ist nicht in der Lage die beschriebenen Herausforderungen zu bewältigen, obwohl viele Grundlagen von PPS-Modellen (vgl. [LÖD08b]; [SCH12a]) implementiert sind. Der Betrieb ist vollständig mit einem ERP-System¹⁸ ausgerüstet. Diese Systeme basieren heute konzeptionell auf dem Ansatz der Manufacturing-Resource-Planning (MRP)¹⁹ und berücksichtigen neben der Planung auch die kurzfristige Kapazitäts-terminierung. Der Auftragsdurchlauf wird durch das ERP-System mit detaillierten arbeitsvorgangsbezogenen Plandurchlaufzeiten und Berücksichtigung begrenzter Kapazitäten geplant. Anstrengungen der Vergangenheit, dieses zentral organisierte System aus der Praxis heraus durch ein Feinsteuerungsmodul ohne theoretische Betrachtung des Steuerungsmodells zu ergänzen, zeigten keinen Erfolg. Der Eingriff einer zentral organisierten Steuerung im Reaktionsprinzip parallel auf mehrere Stellen der komplexen Kette führt zu bereits beschriebenen Blockaden, sich überholenden Aufträgen und steigenden Instabilitäten. Obwohl die Planung auf dem Prinzip der Rückwärtsterminierung²⁰ basiert, lässt sich die ursprünglich geplante Feinterminierung selten einhalten und die Fokussierung des beteiligten Personals verändert sich hin zur Auftragsüberwachung und Bekämpfung der Instabilitäten (vgl. 2.2.2). Die darüber hinaus wirkenden Steuerungsalgorithmen des ERP-Feinsteuerungssystems werden für die beteiligten Mitarbeiter weniger nachvollziehbar und die Akzeptanz geht durch mangelnde Transparenz verloren.

Als Folge davon können logistische Kenngrößen nicht eingehalten werden, das zu manuellen Eingriffen in die Steuerung führt. Die Abbildung 2-14 stellt diese Reaktionskette im Kreislauf dar.

¹⁸ IT-Systeme, die Aufgaben in der kaufmännischen als auch technischen Auftragsabwicklung unterstützen, werden als Enterprise Resource Planning (ERP) Systeme bezeichnet. [MEI12]

¹⁹ Manufacturing-Resources-Planning basiert auf dem sog. MRPII-Konzept und wird in der Literatur auch als konventionelles PPS-Verfahren bezeichnet. [ARN08] (vgl. Kapitel 3)

²⁰ Die Einordnung der Verfahren erfolgt im Vergleich mit dem Stand der Technik in Kapitel 3.

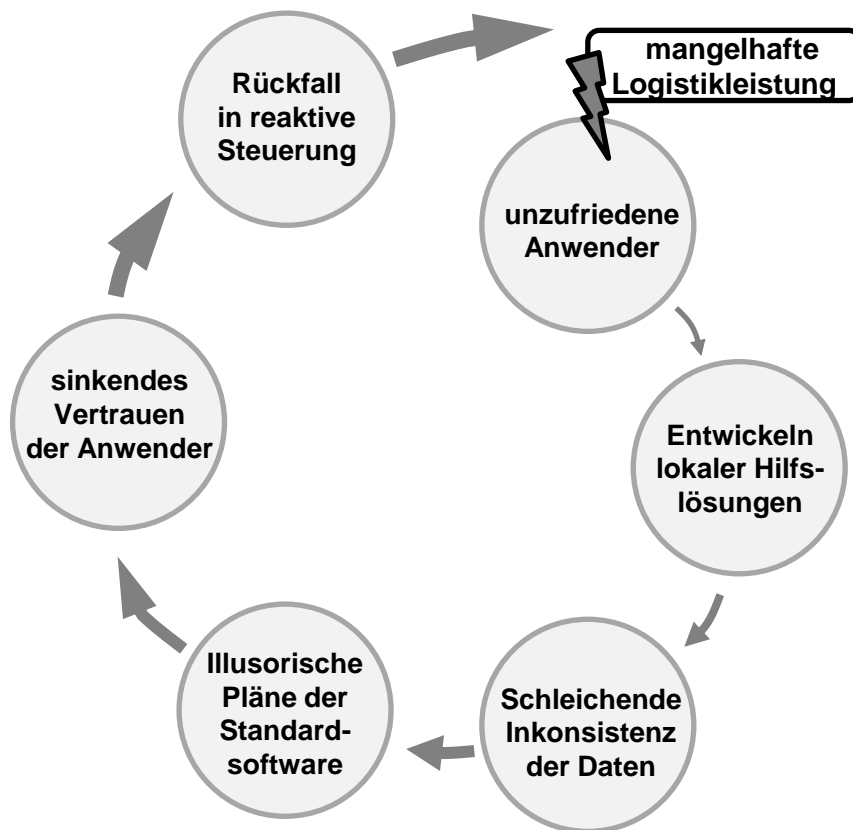


Abbildung 2-14: Symptomgetriebener Fehlerkreis in der Produktionssteuerung [WIE12, S. 12]

Die beteiligten Mitarbeiter verfügen nicht über das umfassende Verständnis der Steuerungssituation, um zielgerichtet Entscheidungen zu treffen. Zentrale Fertigungssteuerer interpretieren im System lediglich über- und unterausgelastete Arbeitsplätze und massive positive wie negative Terminabweichungen. Jeder Bereich entlang der Prozesskette versucht seine eigenen Optimierungsmaßnahmen für Maschinenbelegung und Wartezeiten zu treffen. Ein wesentliches Defizit stellt eine allen Beteiligten bekannte **Methode zu Beherrschung dieser Komplexität** dar.

Zusammenfassend sind die am Markt verfügbaren PPS-Systeme meist in der Lage die Produktionsplanung auf Basis von Vergangenheitsdaten vergleichsweise gut umzusetzen, aber insbesondere eine **situationsbasierte Produktionssteuerung**, wie sie gerade für diese hochkomplexen Produktion gefordert ist, wird meist nicht abgedeckt [MÜL07, FUC13]. In der Praxis fehlen adäquate Reaktionsmöglichkeiten, um auf die erläuterten gewöhnlichen Turbulenzen des Wertstroms bzw. weitere unvorhergesehen Störungen, wie Maschinenausfälle oder andere dynamische Störgrößen (vgl. [BLU13]) zu reagieren. Ohne diese substantielle Verbesserung der Steuerung ist auch eine optimierte vorgelagerte Produktionsplanung nicht vorstellbar.

2.3 Eingrenzung des Gestaltungsbereiches

Die in den Kapiteln 2.1 und 2.2 beschriebenen Herausforderungen bekräftigen die Zielstellung, die Fertigungssteuerung ausgehend von einem wertstromorientierten und ganzheitlichen Ansatz zu optimieren und umfassende Transparenz zu schaffen. Um die Zielsetzung dieser Arbeit (vgl. Kapitel 1.2) zu erreichen, müssen Methoden zur Beherrschung der Komplexität entwickelt werden. In der aktuellen wissenschaftlichen Literatur existieren einzelne Ansätze zur Nivellierung und Stabilisierung (vgl. [GRI12]; [BUH12]; [WUT10]), zur Modularisierung und Entkopplung (vgl. [LAP14]; [SCH12c]), und neuen Entwicklungen, wie dem Einsatz cyberphysischer Systeme und vernetzter IT-Integration (vgl. [SCH13a]; [ENG15]; [REU15]; [GRU15]). Die Übertragung dieser Ansätze auf die vorgestellten Rahmenbedingungen ist nicht ohne spezifische theoretische Modellierung unter Einfluss praktischer Erfahrungen möglich. Man ist heute nicht in der Lage, die Probleme ganzheitlich über die gesamte Prozesskette hinweg zu lösen. Einzelne Maßnahmen, wie zum Beispiel die Einführung eines verbesserten Informationsmanagements, lösen beispielsweise die übergreifenden Probleme zwischen den Werkstattfertigungen nicht. Elementar für die Praxis und wissenschaftlich bisher nicht untersucht ist die Fragestellung, wie eine Vernetzung der Fertigungssteuerung über mehrere Ebenen dieser komplexen Produktion erreicht werden kann und mit welchen praxisorientierten Methoden eine erfolgreiche Umsetzung ermöglicht wird.

Der Gestaltungsbereich dieser Arbeit umfasst dabei das komplexe Umfeld eines konkreten Produktionsstandortes. Dabei werden alle relevanten Prozesse der Produktionssteuerung beginnend mit der Auftragsfreigabe und dem vollständigen Produktionsprozess inklusive aller Arbeitssysteme analytisch betrachtet und in einer Modellbildung abstrahiert. Dieses Modell wird methodisch auf Umsetzbarkeit bewertet, und letztlich exemplarisch in die Praxis umgesetzt und getestet. Eine derartige wissenschaftliche Betrachtung wurde offensichtlich noch nicht in dieser Tiefe und unter Einbezug einer ganzheitlichen Wertstromorientierung für diesen Anwendungsfall durchgeführt.

Hierzu wird eine Betrachtung vom einzelnen Arbeitssystem ausgehend bis zur Integration in die Architektur des PPS-Systems gewählt. Die Betrachtungsebenen sind in Abbildung 2-15 eingegrenzt dargestellt.

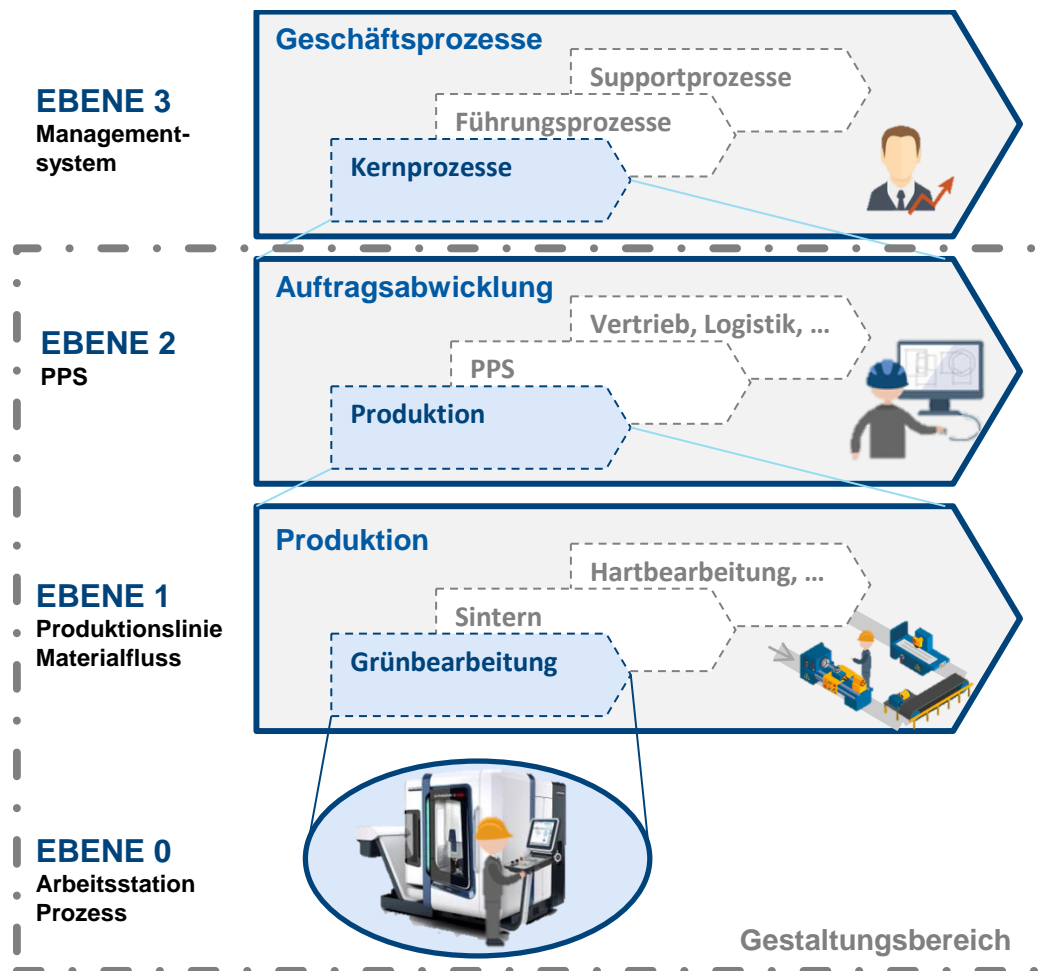


Abbildung 2-15: Gestaltungsebenen der Modellierung

Ganzheitliche Produktionssysteme orientieren sich an Ansätzen wie der Wertstromorientierung und Standardisierung sowie der Vermeidung von Verschwendungen entlang der Prozesskette, um Transparenz und Geschwindigkeit zu erhöhen [DOM15]. „Die entscheidende Herausforderung dabei ist, die Anforderungen von Menschen, Organisation und Technik unter einen Hut zu bringen“ [BUL09, S. 596]. Oft setzen diese Ansätze aber eine produktorientiert segmentierte Produktion voraus.

Zur Erreichung der Ziele ist es notwendig, diese bekannten Ansätze näher zu betrachten und auf Verwendbarkeit zu prüfen. Es gilt darauf basierend neue Ideen und Konzepte zu entwickeln und mithilfe einer Modellierung zu erklären. Die betrachteten Dimensionen der Gestaltung betreffen dabei die **Materialflüsse** und **Arbeitsabläufe** in der Produktion, den **betrieblichen Informationsfluss** und die Einbindung in das **IT-System**, die technologischen Gegebenheiten der Prozesskette, sowie die **Integration der Menschen** in der Produktionssteuerung. Weiterhin gilt es Methoden zu entwickeln, dieses Steuerungsmodell im Praxisbeispiel umzusetzen und dadurch praxisnah zu validieren.

3 Stand der Technik wertstromorientierter Produktionssteuerung

Mit dem Ziel die Defizite des aktuellen Wissensstandes aufzuzeigen, wird in den nachfolgenden Unterkapiteln bezogen auf die vorgestellten Rahmenbedingungen der Stand der Technik beschrieben. Im Kapitel 2 wurde die Ausgangssituation vorgestellt und der Gestaltungsbereich eingegrenzt. Dabei konnte festgestellt werden, dass ein **ganzheitliches Steuerungsmodell** für die vorliegende **verfahrenstechnisch verkettete Werkstattfertigung** bisher fehlt. Hieraus ergibt sich die Fokussierung bei der Beschreibung des Standes der Technik auf diejenigen Methoden und Ansätze, die in der komplexen Auftragsfertigung die Wertstromorientierung verbessern und mithilfe umfassender Transparenz die Entscheidungsfähigkeit und damit die Effektivität der Produktionssteuerung erhöhen. Aufgrund der Betrachtung mehrerer Ebenen im Gestaltungsbereich, werden hier zudem die Methoden ganzheitlicher Produktionssysteme erläutert. Darüber hinaus zeigen aktuelle Ansätze des Informationsmanagements bekannte Wege auf, um durch eine verbesserte IT-Integration die Effizienz der Steuerungsabläufe zu erhöhen. Abschließend wird der bestehende Forschungsbedarf daraus abgeleitet.

3.1 Ziele und Aufgaben

3.1.1 Logistisches Zielsystem

Bisher wurden die wesentlichen Prozesse in der Produktionssteuerung, deren Zielgrößen und allgemeine Begriffe bereits erläutert (vgl. 2.2.1). Diese Ziele werden in diesem Abschnitt vertieft, um in den Folgeabschnitten darauf aufzubauen. „Die zentrale Aufgabe der Produktionslogistik besteht darin, logistische und wirtschaftliche Ziele unter Berücksichtigung der gegenseitigen Abhängigkeiten in bestmöglichem Maße zu erreichen“. [WIE14b, S. 250] Die Abbildung 3-1 stellt mit den Hauptzielrichtungen der Betriebs- und Marktziele das logistische Zielsystem nach WIENDAHL graphisch dar.

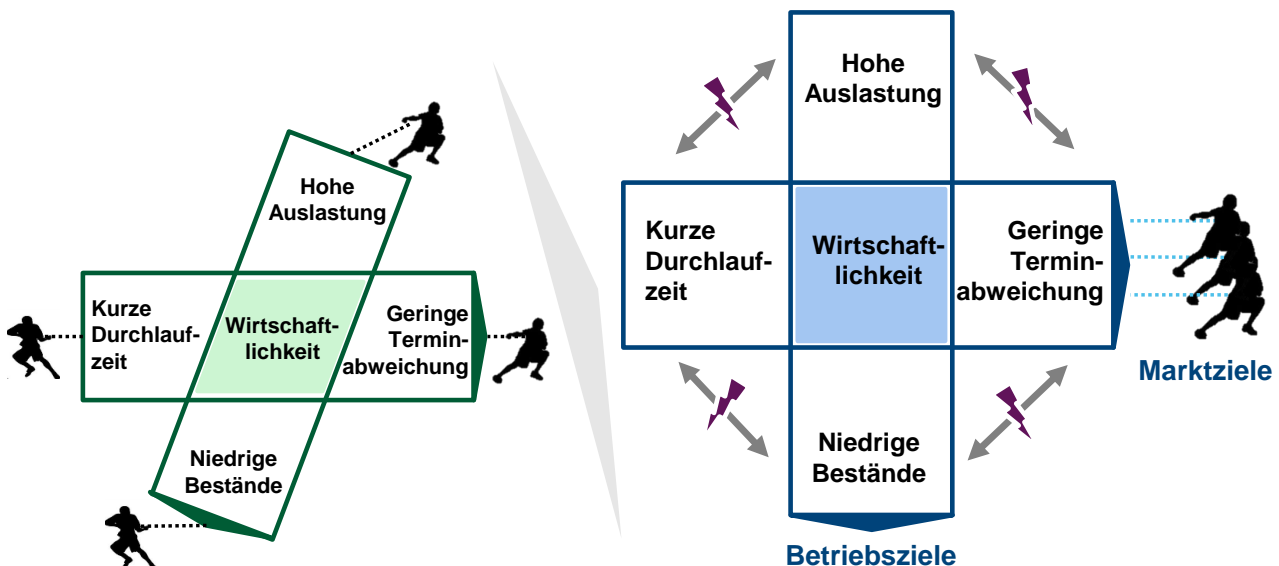


Abbildung 3-1: Ausrichtung des logistischen Zielsystems (in Anlehnung an [MUS13])

Die Marktziele werden dabei durch eine kurze Durchlaufzeit und eine geringe Terminabweichung beschrieben. Die Betriebsziele lassen sich durch geringe Logistik- und Prozesskosten erreichen. Niedrigere Bestände wirken sich dabei vor allem in Form von geringeren Kapitalbindungskosten aus. Eine höhere Auslastung führt im Normalfall zu einer Reduktion der spezifischen Herstellungskosten [WIE14b].

Die Form der Abbildung 3-1 veranschaulicht das dabei entstehende Dilemma in der Produktionssteuerung. Die Auslastung einer Auftragsfertigung nach dem Werkstattprinzip ist aufgrund der Kundenbedarfsschwankungen nur gering beeinflussbar. Die Durchlaufzeit und der Bestand der Aufträge sind durch Materialflussprobleme, Wartezeiten und ineffiziente Prozesse eng miteinander verknüpft. Eine hohe Auslastung erfordert wiederum hohe Bestände, die ihrerseits jedoch lange Durchlaufzeiten hervorrufen. Lange und damit erfahrungsgemäß stark schwankende Durchlaufzeiten stehen jedoch dem Ziel einer hohen Termintreue entgegen [NYH08a]. Die Einhaltung der Liefertermine gilt als wesentliches Maß der Kundenzufriedenheit und ist in der Einzel- und Kleinserienproduktion nach dem Werkstattprinzip die am häufigsten genutzte Steuerungsgröße [FUC13]. Vergleichbar mit der bekannten Ausrichtung schlanker, synchroner Produktionssysteme (vgl. [LIK13]; [TAK08]) an den Marktzielen, lässt sich die Aufgabe der Produktionssteuerung präzisieren. Neben der **kontinuierlichen Gewichtung** der verbleibenden **Zielgrößen**, um das beschriebene Dilemma ins Gleichgewicht zu bringen, gilt es im Wesentlichen, **Liefermenge** und **-termine** einzuhalten (vgl. [WIE02]). Zur Vertiefung der logistischen Zielpositionierung in dieser Arbeit zeigt die Abbildung 3-2 die relevanten Zielgrößen in Form von idealisierten Kennlinien.

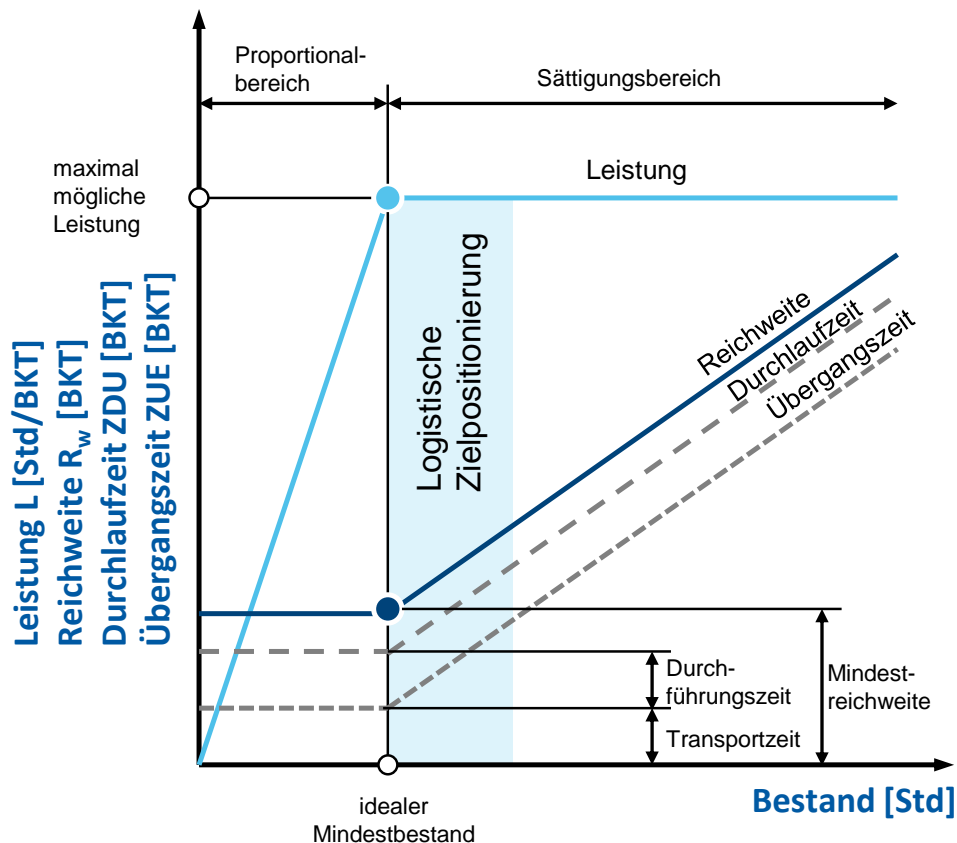


Abbildung 3-2: Idealisierte Produktionskennlinien (vgl. [NYH12])

Der in dieser Abbildung markierte Bereich der „Logistischen Zielpositionierung“ zeigt, dass beim Vorliegen des Mindestbestandes gerade die maximal mögliche Leistung erreicht wird. Das führt begleitend zu minimalen Durchlauf- und Übergangszeiten.

3.1.2 Einordnung der Aufgaben

Die Aufgaben der Produktionssteuerung als Bestandteil des Auftragsabwicklungsprozesses in der PPS wurden mit dem Modell von LÖDDING bereits beschrieben, um grundlegende Herausforderungen dieser Arbeit aufzuzeigen (vgl. Abbildung 2-10). Bei der Einordnung dieser Abläufe in die vollständigen Aufgaben der PPS ist im deutschsprachigen Raum vor allem das Aachener PPS-Modell (vgl. Abbildung 3-3) weit verbreitet, das zwischen Kern- und Querschnittsaufgaben unterscheidet [LUC01].

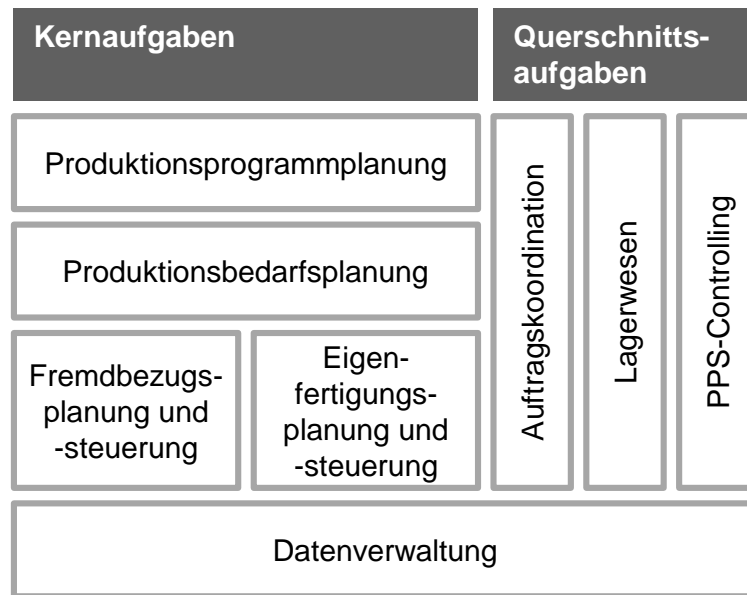


Abbildung 3-3: Aufgabensicht des Aachener PPS-Modells [LUC01]

Das in dieser Arbeit behandelte Steuerungsproblem ist im oben dargestellten Modell vor allem Teil der **Eigenfertigungsplanung und -steuerung**. Hier werden jedoch auch die Querschnittsaufgaben sowie die übergreifende Aufgabe der Datenverwaltung behandelt, da sie Bestandteil des definierten Gestaltungsbereiches (vgl. 2.3) sind. LÖDDING führt an dieser Stelle das vorher beschriebene Modell ein, um die detaillierten Aufgaben der Fertigungssteuerung in einen logischen Zusammenhang zu bringen (vgl. [LÖD08b]). Dabei werden die Wirkzusammenhänge aus der Prozesssicht dargestellt.

Die in diesem Zusammenhang vorgestellten Hauptaufgaben der *Auftragserzeugung*, *Auftragsfreigabe*, *Kapazitätssteuerung* und *Reihenfolgenbildung* lassen sich jedoch auch in der Aufgabensicht unter Berücksichtigung des zeitlichen Horizontes darstellen. Die Abbildung 3-4 stellt diesen zeitlichen Verlauf dar. Die Auftragsplanung bildet als Teil der Produktionsplanung in dieser Darstellung die Ausgangsebene und stellt damit eine weiterführende Einordnung der schon bekannten Ausführungen aus Abschnitt 2.2.1 dar. Dabei werden für die einzelnen zeitlichen Phasen die Begriffe der Grobplanung, Feinplanung und Feinsteuerung²¹ eingeführt.

²¹ Die Begriffe werden in der wissenschaftlichen Literatur nicht eindeutig verwendet. Für eine längerfristige Planung wird an vielen Stellen der Begriff der Grobplanung verwendet. Bei einer detaillierteren Planung, z. B. welches Produkt wann in welcher Menge auf welcher Ressource produziert wird, spricht man von Feinplanung (vgl. [WAR93]). Insbesondere beim Einsatz moderner IT-gestützter Verfahren auf Basis von hochauflösenden Produktionsdaten wird der Begriff Feinsteuerung in der kurzfristigsten Detaillierungsphase verwendet (vgl. [VDI07]; [WES13] und Kapitel 3.4).

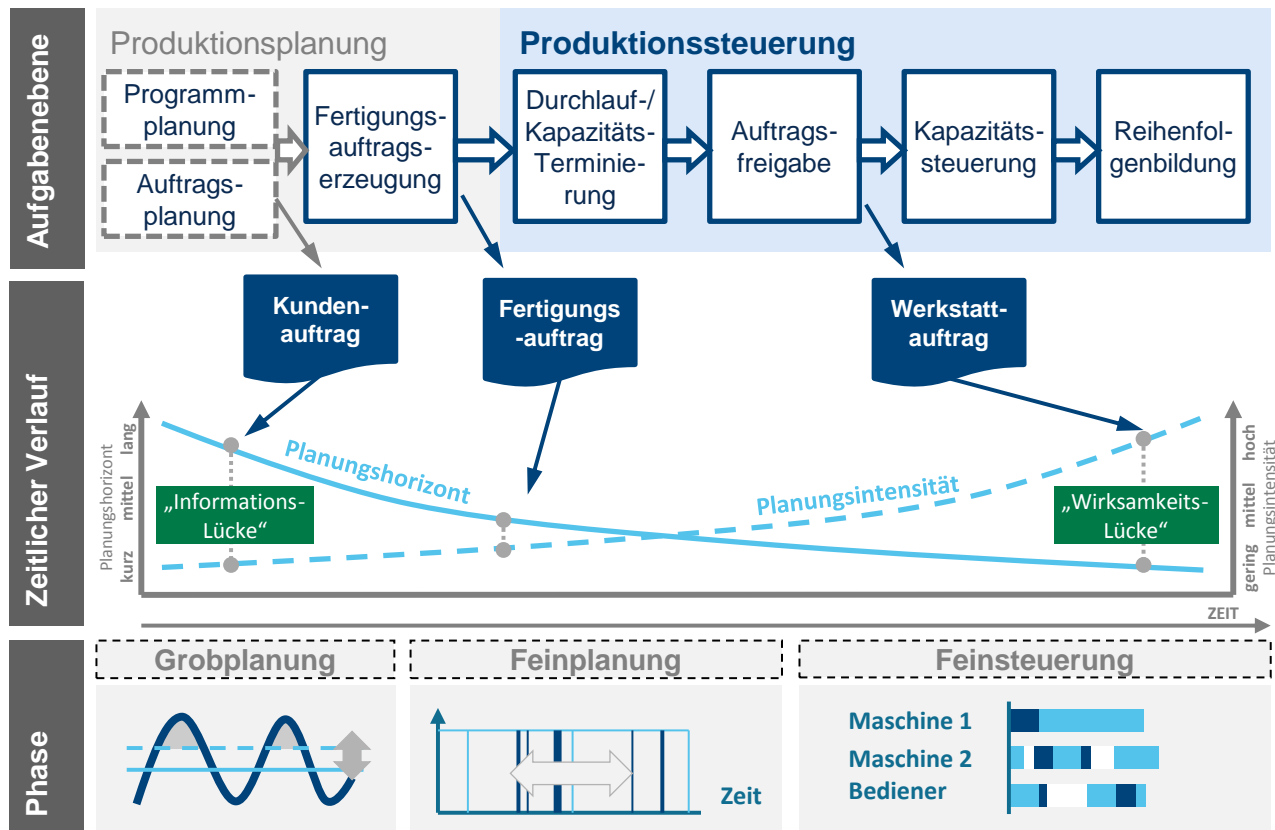


Abbildung 3-4: Aufgabenebenen und Phasen der Produktionssteuerung
(entwickelt aus [SCH12b]; [BOO15]; [MÜT09])

Auf den oberen Ebenen, z. B. der Auftragsplanung, wird mit längeren Planungshorizonten geplant. Auf den unteren Ebenen wird mit höherer Intensität gesteuert. Dies führt zu den allgemein bekannten Problemfeldern der „Informations- und Wirksamkeits-lücke“. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden Prinzipien und Verfahren vorgestellt, die darauf abzielen, insbesondere die auftretende „Wirksamkeitslücke“ zu schließen. Dazu gilt es die Aufgaben der Produktionssteuerung und dazu bekannte Verfahren der Umsetzung entlang der vollständigen Wertschöpfungskette zu betrachten.

Unter Berücksichtigung der Zielstellung wird die Produktionsplanung nur vergleichsweise knapp in dieser Arbeit dargestellt. Daher sei an dieser Stelle die weiterführende Literatur, wie z. B. HACKSTEIN [HAC89], LÖDDING [LÖD08b], DANGELMAIER [DAN09] und SCHUH [SCH12b] genannt.

3.2 Prinzipien der Produktionssteuerung

In diesem Unterkapitel werden bestehende Prinzipien zur Produktionssteuerung vorgestellt, die grundlegend für die Beschreibung existierender Verfahren und Ansätze sind. Unter diesen Prinzipien wird in der Literatur oft eine grundsätzliche methodische Herangehensweise verstanden, bekannte Verfahren zu klassifizieren. Entsprechend der zuvor hergeleiteten Anforderungen einer verfahrenstechnisch verketteten Werkstattsteuerung er-

folgt die Bewertung der spezifischen Logik, die den entsprechenden Prinzipien jeweils zugrunde liegt. Ein besonderer Schwerpunkt liegt dabei auf Verfahrensweisen, die eine Wertstromorientierung fokussieren und den Umgang mit dynamischen Engpässen ermöglichen.

3.2.1 Pull- oder Push-Prinzip

Ein häufig verwendetes Klassifizierungskriterium ist das Pull- oder Push-Prinzip. Nach der Definition von HOPP steuert ein System nach dem Pull-Prinzip, wenn es den Umlaufbestand einer Produktion (engl. „WIP“) explizit auf ein bestimmtes Maß begrenzt, wohingegen beim Push-Prinzip diese Begrenzung nicht erfolgt [HOP04]. WIENDAHL definiert: „Im Gegensatz zum Push-Prinzip, bei dem einzelne Aufträge in der Reihenfolge entsprechend dem Arbeitsplan von Arbeitsstation zu Arbeitsstation geschoben werden, zieht man beim Pull-Prinzip die Aufträge nach dem Warenhausprinzip beginnend mit der letzten Arbeitsstation aus der Fertigung heraus“ [WIE14a, S. 101]. Die Abbildung 3-5 stellt diese Logik gegenüber.

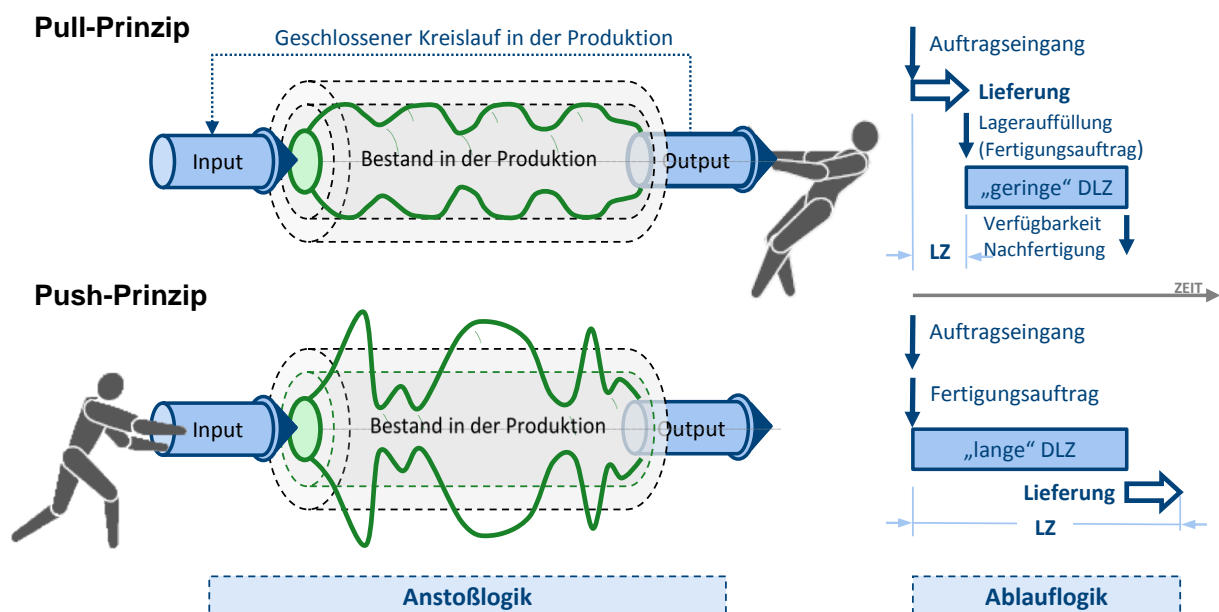


Abbildung 3-5: Logik des Pull- und Push-Prinzips (entwickelt aus [GRI12] zitiert nach [WIE99])

Bei der Produktionssteuerung nach dem **Push-Prinzip** wird die erste Produktionsstufe aufgrund von vorhergesagten Kundenaufträgen angestoßen und anschließend durch alle Produktionsstufen geschoben (vgl. [LIK13]). Dadurch entstehen, wie in Abbildung 3-5 ersichtlich ist, hohe Bestände, die wiederum zu langen Durchlaufzeiten führen.

Beim **Pull-Prinzip** entsteht ein Nachfragesog durch konkrete Kundenabrufe, da die Produktion nach dem Holprinzip organisiert ist und jede Stufe des Produktionsprozesses bei der jeweils vorgelagerten Stufe die Produktion anstößt [DOM15]. Nach der VDI-Richtlinie 2879 steht das Pull-Prinzip in engem Zusammenhang mit modernen Methoden wie Just in

Time/Just in Sequence, Supermarkt, Kanban, Milkrun und Nivellierung [VDI12]. DICKMANN beschreibt die höhere Transparenz und geringere Komplexität der Informationsflüsse mit dem Pull-Prinzip, was die Steuerung der Prozesse maßgeblich vereinfacht [DIC15]. Wertstromorientierte Produktionssysteme orientieren sich nach dem Pull-Prinzip [DOM15]. Zusammenfassend gilt das System in der Literatur als deutlich effizienter und sollte vorrangig eingesetzt werden, obwohl in der Werkstattsteuerung in der Praxis meist das Push-System verwendet wird. Nach GÜNTHER und TEMPELMEIER müssen folgende Voraussetzungen dafür erfüllt sein (vgl. [GÜN14]): **Materialflussorientierte Produktionsorganisation, geringe Schwankungen** und Variabilität der Bearbeitungsumfänge, Weitergabe **fehlerfreier Produkte** und ein **leistungsfähiges Transportsystem**.

3.2.2 Organisationsprinzip

Ein weiteres Kriterium zur Klassifizierung ist eine zentrale oder dezentrale Strukturierung der Organisation des Steuerungsverfahrens. Dabei wird im Wesentlichen unterschieden, von welchem Ausgangspunkt die Wirkung des Verfahrens ausgeht. In einer Werkstattsteuerung unterscheidet die Literatur die Entscheidungsebenen der Lenkung (planerische Entscheidungen) und Ausführung (Wertschöpfung) [WIE02]. Dabei erfolgt die Verteilung der Steuerungskompetenzen auf die einzelnen Instanzen. Das bedeutet beispielsweise bei einer zentralen Organisation, dass Steuerungsimpulse mittels eines PPS-Systems erzeugt werden, in dem alle Daten zentral und stetig aktualisiert vorliegen. Eine dezentrale Werkstattsteuerung teilt Aufgaben auf und lässt zu, dass Entscheidungen auch in der Instanz der Ausführung getroffen werden (vgl. [LÖD08b]).

Das aus Kapitel 2 bekannte MRPII-Konzept gilt als Beispiel für eine zentrale Organisationsstruktur. Häufig erfolgen dabei zentrale Entscheidungsprozesse nicht ausreichend kurzfristig, wodurch schnelle Reaktionen und Anpassungen des Produktionssystems nur schwer realisierbar sind. Nachteilig ist das insbesondere für die Kleinserien- und Einzelteilerfertigung, da hier weniger stabile und vorhersehbare Bedingungen vorliegen als beispielsweise in der Großserie (vgl. [ENG15]). REINHARDT, SCHOLZ-REITER und OSTGATHE beschreiben dahingegen, dass die Umstellung zu dezentralen Steuerungseinheiten einerseits die Flexibilität und Reaktionsgeschwindigkeit in der Ausführung der Steuerungsaufgaben erhöht. Andererseits besteht die Gefahr, dass die zusammenfassende Abstimmung zwischen mehreren selbststeuernden, dezentralen Regelkreisen fehlt und dadurch das übergeordnete Optimum im Produktionssystem nicht garantiert werden kann (vgl. weiterführend [OST12]; [REI13]; [SCH08b]). Als Folge davon können logistische Gesamtziele und eine übergeordnete Wertstromorientierung im Produktionssystem nur schwer eingehalten werden.

Um die Vorteile der zentralen und dezentralen Steuerung miteinander nutzbar zu machen, werden in der Literatur die hybriden Organisationsstrukturen beschrieben. Hierzu werden Steuerungsaufgaben in geeigneter Form auf zentrale und dezentrale Stellen verteilt. Die Steuerungszentrale übernimmt dazu oft ausschließlich mittelfristige planerische Aufgaben (z. B. Grobplanung; vgl. Abbildung 3-4), wohingegen lokale Steuerungsbereiche in Form der **Selbststeuerung**²² schnelle und flexible Entscheidungen treffen und auf Störungsergebnisse reagieren. [OST12, WIN08, SCH08b]

„Die Dezentralisierung erfordert die Vorgabe von lokalen Zielen, die auf die überlagerten Zielsetzungen abgestimmt sind. Die lokalen Organisationseinheiten sollten durch entsprechende Freiheitsgrade in der Lage sein, die zentral vorgegebenen Ziele einzuhalten.“ [BOR09, S. 51]

Insbesondere für die hier behandelte Auftragsfertigung nach dem Verrichtungsprinzip wird festgestellt, dass eine zentrale Steuerungsstelle, die auf eine umfassende logistische Zielerreichung und übergeordnete Wertstromorientierung hinwirkt, notwendig ist. Eine hybride Organisationsstruktur, die partielle Steuerungsaufgaben in die Ausführungsebene überträgt, kann die Flexibilität und Geschwindigkeit in der Produktionssteuerung durch eine höhere Prozessnähe und die Reduktion der Steuerungskomplexität erhöhen. „Eine Möglichkeit, Selbststeuerung umzusetzen, besteht in der Entwicklung von Selbststeuerungsmethoden, die einen Rahmen zur Entscheidungsfindung der logistischen Objekte liefern“ [SCH12c, S. 129]. Diese methodische Umsetzung eines adäquaten **Zentralisierungsgrades** stellt daher einen vielversprechenden Teilaspekt für die Modellierung der Produktionssteuerung in dieser Arbeit dar. Eine wesentliche Grundvoraussetzung dafür ist nach KLETTI ein effizientes Informationsmanagement, das in weiterführend Kapitel 3.4 behandelt wird (vgl. [KLE06]).

3.2.3 Flussorientierung

Als drittes Merkmal zur logischen Differenzierung von Steuerungssystemen wird hier das Prinzip der Flussorientierung ausgeführt. Das Ziel des flussorientierten Prinzips besteht in der Sicherstellung eines gleichmäßigen Auftragsstromes. Diesen gilt es auch in einer variantenreichen Auftragsfertigung mit hohen externen Bedarfsschwankungen aufrecht zu erhalten. In der Zusammenfassung besitzt die Grundgesamtheit aller Aufträge unter diesem Prinzip eine geringe Durchlaufzeitstreuung. [BOR09] Im Gegensatz dazu führt WIENDAHL den Begriff der „Turbulenzorientierung“ ein. Dabei werden ein vermehrt heterogener Auftragsfortschritt und deutlich stärker schwankende Durchlaufzeiten festgestellt [WIE02]. Die Abbildung 3-6 vertieft diese beiden Logiken.

²² „Selbststeuerung logistischer Prozesse ist gegeben, wenn das logistische Objekt Informationsverarbeitung, Entscheidungsfindung und -ausführung selbst leistet“ [NYH08b, S. 140]

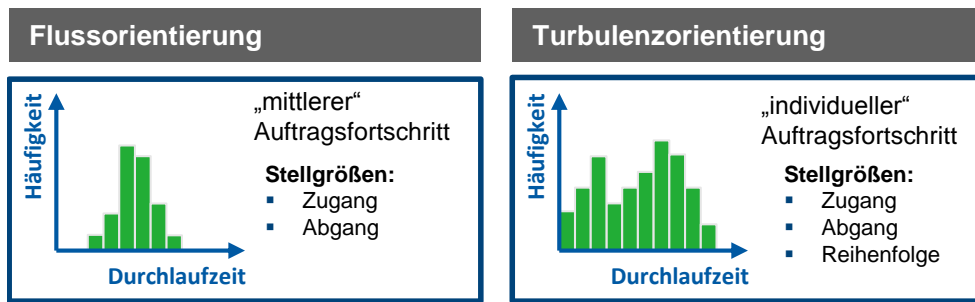


Abbildung 3-6: Logik der Fluss- und Turbulenzorientierung im Vergleich [WIE02]

BORNHÄUSER stellt die dargestellte Logik detailliert aus der Sichtweise einer Werkstattsteuerung gegenüber (vgl. [BOR09]). Dabei sind Unternehmen, die intern Ihre Kapazitäten flexibilisieren, Rüstzeiten reduzieren und Prozesse stabilisieren, eher befähigt, eine flussorientierte Ausrichtung zu realisieren. Es wird dabei festgestellt, dass ein gleichmäßiger Auftragsstrom mit einer Sichtweise auf die Ressourcen und flexiblen Kapazitäten ein vorteilhaftes Gestaltungsmerkmal darstellt. „Auch die Erreichung der Ziele einer schlanken Produktion erfolgt durch eine konsequente Umsetzung der Standardisierung sowie der Flussorientierung“ [GRU10, S. 8].

Das Prinzip, alle Bearbeitungsschritte in einer engen Sequenz auszuführen und dadurch mit einem kontinuierlichen Wertfluss eine Wertstromorientierung zu erreichen, ist insbesondere für produktorientierte Fertigungsstrukturen lange bekannt (vgl. [WOM91]). Im Bereich der Werkstattsteuerung von verrichtungsorientierten Produktionen wird in der aktuellen Literatur die generelle Anwendbarkeit beider Prinzipien beschrieben (vgl. [ZIS12]). Beispielsweise verfolgen die in der Praxis häufig im Einsatz befindlichen Leitstände das turbulenzorientierte Prinzip, da eine softwaregestützte Feinsteuerung jedes Arbeitsganges kontinuierlich Reihenfolgevertauschungen realisiert [FUC13]. Die Flussorientierung stellt dennoch in der komplexen Produktion von Sinterbauteilen ein wesentliches Grundprinzip dar, um eine übergeordnete Wertstromorientierung zu etablieren, wobei es hierzu ein Übertragungskonzept zu entwickeln gilt.

3.3 Verfahren wertstromorientierter Produktionssteuerung

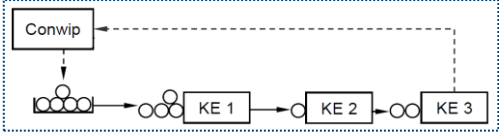
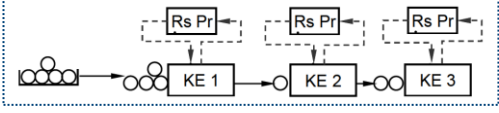
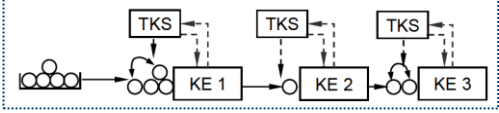
Auf der Basis der in Kapitel 3.2 eingeführten Prinzipien und der vorher erläuterten Aufgaben und Prozesse in der Produktionssteuerung werden in diesem Kapitel die relevanten Verfahren und methodischen Ansätze vorgestellt. Eine Übersicht führt dazu zunächst in die wesentlichen konventionellen Verfahren ein, stellt diese gegenüber und bewertet deren Relevanz für die vorliegende Problemstellung. Weiterführend werden Ansätze beschrieben, die auf Basis konventioneller Verfahren durch verbesserte Wertstromorientierung, die Produktionssteuerung im Produktionssystem weiter integrieren. Abschließend erfolgt die Erläuterung aktueller Forschungsansätze zur verbesserten situationsbasierten Adaption der Produktionssteuerung im Unternehmen und den dazu notwendigen Voraussetzungen.

3.3.1 Übersicht konventioneller Verfahren

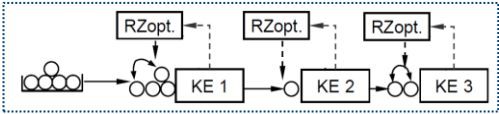
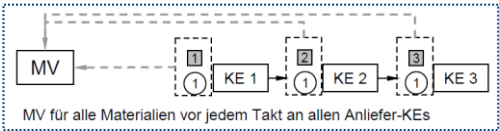
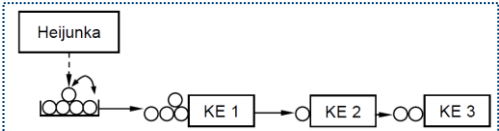
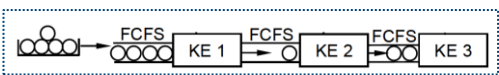
In der Vergangenheit wurden zahlreiche Verfahren der Fertigungssteuerung entwickelt, die sich sowohl in der Literatur, als auch in der Praxis etabliert haben. Diese Verfahren werden innerhalb dieses Abschnitts als konventionelle Verfahren bezeichnet. Die bisher vorgestellten vier Hauptaufgaben der Fertigungssteuerung werden dabei mit unterschiedlichen Verfahren erfüllt, wobei teilweise mehrere der genannten Aufgaben auch mit einem Verfahren abgedeckt werden können. Im Vergleich der Herausforderungen mit dem Stand der Technik wurden die relevanten konventionellen Verfahren für diese Arbeit identifiziert und in Tabelle 3-1 zusammengefasst dargestellt.

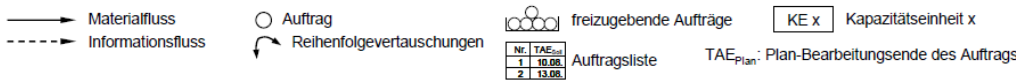
Tabelle 3-1: Übersicht konventioneller Steuerungsverfahren

(zitiert nach [BOR09, S. 60ff.] und [LÖD01, S. 27ff.]

Steuerungsverfahren	Beschreibung
ConWiP <i>Constant Work in Progress</i> Literatur: [LÖD08b] [LÖD01] [HOP11]	 <p>ConWiP verfolgt das Ziel, den Umlaufbestand (WIP) auf einem konstanten Niveau (Anzahl an Aufträgen, Anzahl an Bauteilen oder Arbeitsvorrat in Vorgabestunden) zu halten. Ein Auftrag für die Bearbeitung in der Produktion wird erst dann freigegeben, wenn der Umlaufbestand eine definierte untere Bestandsgrenze unterschreitet. Die von einem überlagerten Planungssystem erzeugten Aufträge werden nach ihrer Dringlichkeit sortiert. Die ConWiP Steuerung kann mit einfachen Hilfsmitteln (z. B. ConWip) Karten umgesetzt werden.</p>
Rs Pr <i>Rückstandsorientierte Produktionsregelung</i> Literatur: [LÖD08a]	 <p>Die Rückstandsorientierte Produktionsregelung basiert auf dem Grundgedanken, ein regelungstechnisches Modell auf die Kapazitätseinheiten einer Produktion anzuwenden. Das Hauptelement des Konzepts ist eine Rückstandsregelung, um die Kapazität der Produktion auf den Bedarf anzupassen. Dazu werden Aufträge arbeitsvorgangsbezogen durch das Planungssystem terminiert. Der Rückstand wird kontinuierlich durch „Rückstandsjäger“ ermittelt aus der Differenz des Plan- und Ist-Abgang. Der ermittelte Rückstand löst Kapazitätsanpassungen aus, mit dem Ziel, den Rückstand möglichst schnell wieder abzubauen.</p>
TKS <i>Terminorientierte Kapazitätssteuerung</i>	 <p>TKS bedingt eine arbeitsvorgangsbezogene Terminierung durch das überlagerte Planungssystem. Die resultierenden Plantermine je Arbeitsvorgang sind Eingangsgrößen für den Verfahrensablauf. Ein wesentliches Merkmal ist der Einsatz der kurzfristigen</p>

Literatur: [BEG05]	Kapazitätsflexibilität, um die Termintreue von Aufträgen sicherzustellen. Bei jedem Zugang eines Auftrags an einer Kapazitätseinheit (KE) erfolgt primär eine Reihenfolgebildung nach der Priorität des Planendtermins der Aufträge im aktuellen Direktbestand. Im Anschluss erfolgt die Berechnung der voraussichtlichen Abgangsterminabweichung gegenüber dem Planendtermin. Die voraussichtliche Abgangsterminabweichung der Aufträge regelt Kapazitätsanpassungen, um der drohenden Verspätung von Aufträgen entgegenzuwirken.
MRP II <i>Material Requirements Planning</i> Literatur: [ARN09], [HOP11] [LÖD08a]	MRP II stellt die Weiterentwicklung von MRP (Manufacturing Resources Planning) dar. Der Bedarf an Fertigprodukten legt bei diesen Verfahren den Liefertermin und die Menge fest. Mittels einer Rückwärtsterminierung werden die untergeordneten Bedarfe geplant und ein Produktionsauftrag erstellt, wenn der Sicherheitsbestand den Bedarf nicht innerhalb der Lieferzeit decken kann. Das Verfahren ist so flexibel, dass es für nahezu alle Fertigungsarten geeignet ist. Obwohl beim MRP II die Kapazitätsplanung verbessert wurde, wird bei der Einplanung der Aufträge die aktuelle Situation, wie z. B. die tatsächliche Auslastung, nur unzureichend betrachtet und mit statischen Durchlaufzeiten geplant.
BOA <i>Belastungsorientierte Auftragsfreigabe</i> Literatur: [LÖD08b] [WIE14b]	<div data-bbox="395 862 893 996" data-label="Diagram"> </div> <p>Die BOA geht davon aus, dass ein überlagertes Planungssystem die Aufträge erzeugt und einen Planstarttermin vorgibt. In einem ersten Schritt erfolgt die Sortierung der freizugebenden Aufträge nach deren Dringlichkeit. Für diesen Prozess wird üblicherweise ein Vorgriffshorizont und alle entsprechenden Aufträge einbezogen. Dabei erfolgt für jeden freizugebenden Auftrag, an den jeweils zu durchlaufenden Kapazitätseinheiten, eine Überprüfung der individuell definierten Bestandsgrenze. Die Belastungssituation durch den Bestand an den einzelnen Kapazitätseinheiten entscheidet damit über die Auftragsfreigabe.</p>
DBF <i>Dezentrale bestandsorientierte Fertigungsregelung</i> Literatur: [LÖD08b] [LÖD01]	<div data-bbox="395 1339 893 1473" data-label="Diagram"> </div> <p>Die DBF geht wie die BOA davon aus, dass Aufträge mit Planstartterminen vorliegen. Im Gegensatz zur BOA erfolgt die Freigabeprüfung nicht für den gesamten Auftrag, sondern für jeden Arbeitsvorgang. Die Bearbeitungsfreigabe eines Arbeitsvorgangs an einer Kapazitätseinheit erfolgt durch die im Arbeitsplan folgende KE. Diese trifft die Entscheidung auf Basis der Bestandsgrenze, die für jede Kapazitätseinheit festlegt wie hoch der Gesamtbestand maximal sein darf. Der Verfahrensablauf erlaubt es, dass die wesentlichen Entscheidungen dezentral getroffen werden.</p>
Leitstandsteuerung Literatur: [WIE97]	<div data-bbox="395 1794 893 1928" data-label="Diagram"> </div> <p>Leitstände werden überwiegend als Systemkomponenten im Rahmen der PPS eingesetzt. Dabei sollen die aufgestellten Produktionspläne durch eine kurzfristige Planung, Steuerung und Überwachung möglichst optimal auf den Produktionsbereich</p>

	umgesetzt werden (vgl. Kapitel 3.4). Die Verknüpfung von Rückmeldungen und Planungsdaten im Rahmen eines elektronischen Leitstandes bietet die Möglichkeit, den Auftragsdurchlauf zeitnah zu verfolgen, verschiedene Auftragsreihenfolgen durchzuspielen und Engpasssituationen zu erkennen.
Schlupf Literatur: [LÖD08a]	 <p>Die Schlupfzeitsteuerung der Aufträge sortiert die Bearbeitungsreihenfolge der Aufträge an einer Kapazitätseinheit mit dem Ziel, die Termintreue der Aufträge zu erhöhen. Das Sortierkriterium der Schlupfzeitsteuerung ist die zum Planungszeitpunkt verbliebene Gesamtübergangszeit bis zum Plan-Bearbeitungsende des Auftrags. Für die Berechnung des sogenannten Restschlupf sind die Durchführungszeiten der restlichen Arbeitsvorgänge des Auftrags, die Mindestübergangszeiten und das Plan-Bearbeitungsende des Auftrags als Input notwendig. Der Auftrag mit dem kleinsten Restschlupf erhält die höchste Priorität an der Kapazitätseinheit.</p>
TFS <i>Taktororientierte Fertigungssteuerung</i> Literatur: [BOR09]	 <p>Die TFS bietet einen Kompromiss aus festgelegtem Mengengerüst und einen flexiblen Terminplan für eine Werkstattsteuerung. Dazu wird die Fertigung in feste Durchlaufzeitsegmente eingeteilt, in die alle Aufträge eingelastet werden. Die Regelgröße Leistung passt dabei nicht die Ecktermine der Aufträge, sondern den Kapazitätsbedarf des Segmentes an. Dadurch ergibt sich eine enorme Anforderung an die Kapazitätsflexibilität der Durchlaufzeitsegmente.</p>
Heijunka Literatur: [LIK13] [ERL10]	 <p>Die Heijunka-Steuerung stammt aus dem Toyota Produktionssystem und ist die japanische Bezeichnung für eine Freigabe ausgeglichener Produktionsmengen und -varianten. Die sogenannte Heijunka-Box visualisiert den Zeitpunkt der freizugebenden Variante, Menge und die Reihenfolge der Freigabe. Das übergeordnete Ziel dieser Steuerung ist die Nivellierung des Auftragsdurchlaufes</p>
FIFO <i>First In First Out</i> bzw. FCFS <i>First Come First Serve</i> [LÖD08b], [ERL10]	 <p>Bei der FIFO (First in First out) Steuerung verlassen die Aufträge die KE in der gleichen Reihenfolgen, in der sie die KE erreicht haben. Die FCFS-Regel vermeidet Reihenfolgevertauschungen, indem die Bearbeitung der Aufträge an der Kapazitätseinheit in der Reihenfolge Ihrer Ankunft abgearbeitet werden. Im Gegensatz zu FIFO ist bei FCFS nicht gewährleistet, dass die Aufträge auch in der Reihenfolge Ihrer Ankunft die Kapazitätseinheit wieder verlassen. Vor allem bei Kapazitätseinheiten mit mehreren Parallelarbeitsplätzen.</p>
Engpass-	Unter der Engpasssteuerung werden Auftragsfreigabeverfahren zusammengefasst, die auf der Annahme basieren, dass Auslastungsverluste an einem Engpass-

steuerung Literatur: [WEI92] [SEI06] [LÖD08b] [HOP11]	Arbeitsystem zu Leistungsverlusten des gesamten Produktions-bereiches führen. Verfahren dazu sind beispielsweise Optimized Production Technology (OPT), Engpassorientierte Fertigungssteuerung (EOF), oder Pull-From-The-Bottleneck-Method (PFB). Ein Auftrag wird dabei i. d. R. nur freigegeben, wenn das Engpass-Arbeitsystem einen Auftrag abgeschlossen hat. Bis zur KE, die den Engpass darstellt, wird der komplette Arbeitsbereich bestandsgeregt (vergleichbar mit dem ConWiP verfahren). Nach dem Engpass-Arbeitsystem erfolgt keine Bestandsregelung.
Kanban Literatur: [LÖD08b] [ARN09] [LIK13]	Das Kanban-Verfahren wurde innerhalb des Toyota-Produktionssystems erstmals erfolgreich eingesetzt. Die wesentliche Steuergröße für die Auftragsfreigabe ist dabei die Höhe des Lagerbestandes. Ein Nachfertigungsauftrag wird erzeugt, wenn es eine Differenz zwischen der Bestandsobergrenze und dem aktuellen Bestand eines Produktes gibt. Gesteuert wird sowohl der Höchstbestand, als auch die Nachproduktion und der Transport über Karten (sog. Kanban-Karten) und bedeutet damit vollständige dezentrale Auftragserzeugung.
KOZ / LOZ EDD Rz Opt. Literatur: [LÖD08b] [GÜN14]	KOZ (Kürzeste Operationszeit) / LOZ (Längste Operationszeit) sind Verfahren, die eine Prioritätsregel zur Reihenfolgenbildung von Aufträgen an KE darstellen. Bei KOZ hat der Auftrag mit der kürzesten Bearbeitungszeit (Operationszeit) den Vorrang. Bei LOZ ist die Regel umgekehrt und die längste Bearbeitungszeit bekommt die höchste Priorität. Die Priorisierung nach dem frühesten Plan-Endtermin (engl.: earliest due-date EDD) legt die Reihenfolgenpriorität der Aufträge nach dem Fertigstellungs-termin fest. Rüstzeitoptimierende Reihenfolgebildung (RZ opt.) sortiert die Bearbeitungsreihenfolge der Aufträge im Direktbestand einer Kapazitätseinheit, so dass sich der Rüstaufwand minimiert.
Legende:	

Neben den in Tabelle 3-1 vorgestellten Steuerungsverfahren existieren noch weitere Verfahren, die in dieser Arbeit von untergeordneter Bedeutung sind. Aus diesem Grund sei daher an dieser Stelle auf die Literatur (LÖDDING [LÖD08b]; HOPP & SPEARMAN [HOP11]) verwiesen.

Klassifizierung konventioneller Verfahren

Die Einsatzmöglichkeiten der weiter oben vorgestellten Steuerungsverfahren lassen sich in einem nächsten Schritt nach dem entsprechenden Einsatzfeld und im Vergleich mit den vorgestellten Prinzipien klassifizieren. Diese hier durchgeführte Klassifizierung bildet die Grundlage für die nachfolgende Bewertung im Vergleich mit der Problemstellung dieser Arbeit. Die Einordnung in Tabelle 3-2 berücksichtigt dabei zwei unterschiedliche Arten von Eignungskriterien.

Tabelle 3-2: Klassifizierung und Bewertung konventioneller Steuerungsverfahren

Eignung		Fertigungsart			Steuerungsprinzip					Funktionalität				
		Werkstattsteuerung komplexer Materialfluss	Werkstattsteuerung einfacher Materialfluss	Inselfertigung (segmentierte Fertigung)	PULL	PUSH	Flussorientierung	Zentral	Dezentral	IT-Integration (PPS)	Bezug zur Gegenwart	Ereignisorientiert	Regelorientiert	Relevanz in der Modellierung in dieser Arbeit
Verfahren														
	Kanban		(X)	X	X		X		X		X		X	
	MRP II	X	X	X		X		X		X			X	O
	Bestellbestand	X	X	X		X		X		X			X	
	Basestock	X	X	X		X		X		X		X		
	DBF		X	X	(X)		(X)		X	X	X	X		O
	BOA	(X)	X	X	(X)		X	X		X		(X)	X	O
	Heijunka		(X)	X	(X)		X		X				X	
	ConWiP		(X)	X	X		X		X		X	(X)	X	
	Leitstand	X	X	X		X		X		X	(X)	(X)		O
	Engpass (OPT)		(X)	X	(X)	(X)	(X)	X	(X)	(X)	(X)		X	
	FCFS		(X)	X	X		X		X		(X)	X		O
	FiFO		(X)	X	X		X		X		(X)	X		O
	Schlupf		(X)	X		(X)			X	(X)	(X)		X	
	Rz Opt	(X)	(X)	X		(X)			(X)		(X)		X	
	KOZ/LOZ/EDD	X	X	X		(X)			(X)		(X)		X	O
	TKS	(X)	X	X		(X)		X		X			X	
	TFS	(X)	X	X	(X)		(X)	X		(X)			X	O
	Rs Pr	X	X	X		(X)		X		X		(X)	(X)	

Auftragserzeugung

Auftragsfreigabe

Reihenfolgenbildung

Kapazitätssteuerung

Parallel: Auftragserzeugung / –freigabe

Parallel: Auftragsfreigabe / Reihenfolgenbildung

Legende:

X = trifft zu

(X) = trifft eingeschränkt zu

O = Kriterien weiterführend relevant

Die Klassifizierung nach den Kriterien der Fertigungsart und der Steuerungsprinzipien berücksichtigt die dazu betrachteten Literaturstellen (vgl. [LÖD01, LÖD08b, SCH11, GÜN14, BOR09, WIE02, FUC13, KIE11, ENG15, SEI06, HOP04, HOP04, WEI92, WIE99, ARN09]). Die Kriterien der Eignung aufgrund der IT-Integration, Gegenwartsbezug und Ereignisorientierung sind dabei relevant für nachfolgende Betrachtungen.

Die Tabelle verdeutlicht, dass insbesondere für Werkstattsteuerungen mit komplexen Materialflüssen der Umfang, der in der Literatur beschriebenen Verfahren, begrenzt ist. Trotz einer Vielzahl von Verfahren für die Auftragserzeugung und Auftragsfreigabe erfolgt die

Freigabe in der Praxis oft nicht getrennt und ohne Berücksichtigung der aktuellen Ereignisse in der Produktion. Darüber hinaus decken konventionelle Verfahren meist maximal zwei Steuerungsaufgaben parallel ab und können so beispielsweise isoliert betrachtet für die Auftragsfreigabe und Reihenfolgenbildung eingesetzt werden. Keines der Verfahren integriert die Auftragsfreigabe, die Reihenfolgenbildung und die Kapazitätssteuerung und ermöglicht eine schnelle Konfiguration, um die Anforderungen der verfahrenstechnisch verketteten Werkstattsteuerung dieser Arbeit, zu erfüllen.

In der Literatur werden die genannten konventionellen Verfahren oft einzeln betrachtet und meist vor dem Hintergrund von produktorientierten Fertigungsstrukturen verglichen, aber nicht miteinander angewandt (vgl. [SCH10]). Einzelne Verfahren werden aufgrund dieser eher isolierten Betrachtungsweise, für Werkstattsteuerungen mit komplexen Materialflüssen, als weniger geeignet eingestuft (z. B. FiFo, DBF oder OPT). Dies zeigt das Potential auf, insbesondere diejenigen Verfahren näher zu betrachten, die die beschriebene vorteilhafte Flussorientierung und das Pull-Prinzip unterstützen, um eine erhöhte Transparenz der Abläufe zu ermöglichen. Dabei gilt es nicht das Ziel der Übertragung der bekannten vollständigen Verfahrensweisen zu verfolgen, sondern vielmehr die Verwendung der relevanten Verfahrenscharakteristiken für die Modellierung eines ganzheitlichen Steuerungsansatzes zu verwenden.

3.3.2 Wertstromorientierte Ansätze

Die konventionellen Verfahren ermöglichen in vielen Fällen lediglich eine auf einzelne Aufgaben fokussierte Sichtweise der Produktionssteuerung. Eine wesentliche Zielrichtung dies zu verbessern ist, die **Produktionssteuerung als wichtigen Bestandteil in das Produktionssystem weiter zu integrieren**. Hierzu kommt insbesondere der horizontalen Integration in der Ausführungsebene der Wertschöpfung und zugleich der vertikalen Integration in die übergeordneten Steuerungs- und Geschäftsprozesse eine hohe Bedeutung zu.

In der Literatur beschreibt STÜRMANN hierzu die Ansätze der horizontalen und vertikalen Synchronisation, durch die sich generell ein hohes Steuerungspotential zur Verbesserung der logistischen Ziele ergibt. Oftmals sind diese Ansätze in der Einzel- und Kleinserienproduktion allgemein unzureichend implementiert, da die entsprechenden Konzepte fehlen [STÜ12]. Die Verbindung der Produktionssteuerung mit den Elementen der Schlanken Produktion (vgl. Kapitel 3.5: Ganzheitliches Produktionssystem) ist bereits in der Großserie erfolgreich umgesetzt. Diese synchronisierten Produktionsabläufe beschreibt TAKEDA (vgl. [TAK09]). Der Ansatz von STÜRMANN versucht diese Idee auf Einzel- und Kleinserienproduktionen in Form der Synchronisation von Fertigungs- und Montageprozessen zu übertragen. Die Literatur beschreibt auch einige allgemeine Ansätze, wie diese Ideen der Nivellierung, Glättung und Synchronisation für den Bereich funktionsorientiert strukturierter

Produktionen von Kleinserien umgesetzt werden können (vgl. [DEU11]; [GRU10]; [WUT10]). Bei diesen Ideen handelt es sich jedoch meist um theoretische Ansätze und weniger um erprobte Umsetzungskonzepte.

Die Methodik der "Wertstromorientierten Produktionssteuerung" kombiniert dabei Prinzipien der schlanken Produktion mit den vorgestellten konventionellen Steuerungsverfahren durch IT-Integration im ERP- oder MES-Systems²³ (beispielsweise MRP, Kanban, CON-WIP). Die Bedürfnisse der variantenreichen Einzel- und Kleinserienfertigung werden dabei berücksichtigt. Dieser Ansatz verfolgt das Ziel, den Einfluss der Konfiguration der Produktionssteuerung auf die logistische Leistung (vgl. Kapitel 3.1: Bestand, Termintreue, Durchlaufzeit, Auslastung) in der Gesamtheit zu ermitteln. [SCH10]

Der Ansatz von SCHUH basiert dabei im Wesentlichen auf der Wirklogik von LÖDDING, die in dieser Arbeit bereits mehrfach zitiert wurde. Die Abbildung 3-7 verschafft einen Überblick über die „Wertstromorientierte Produktionssteuerung“.

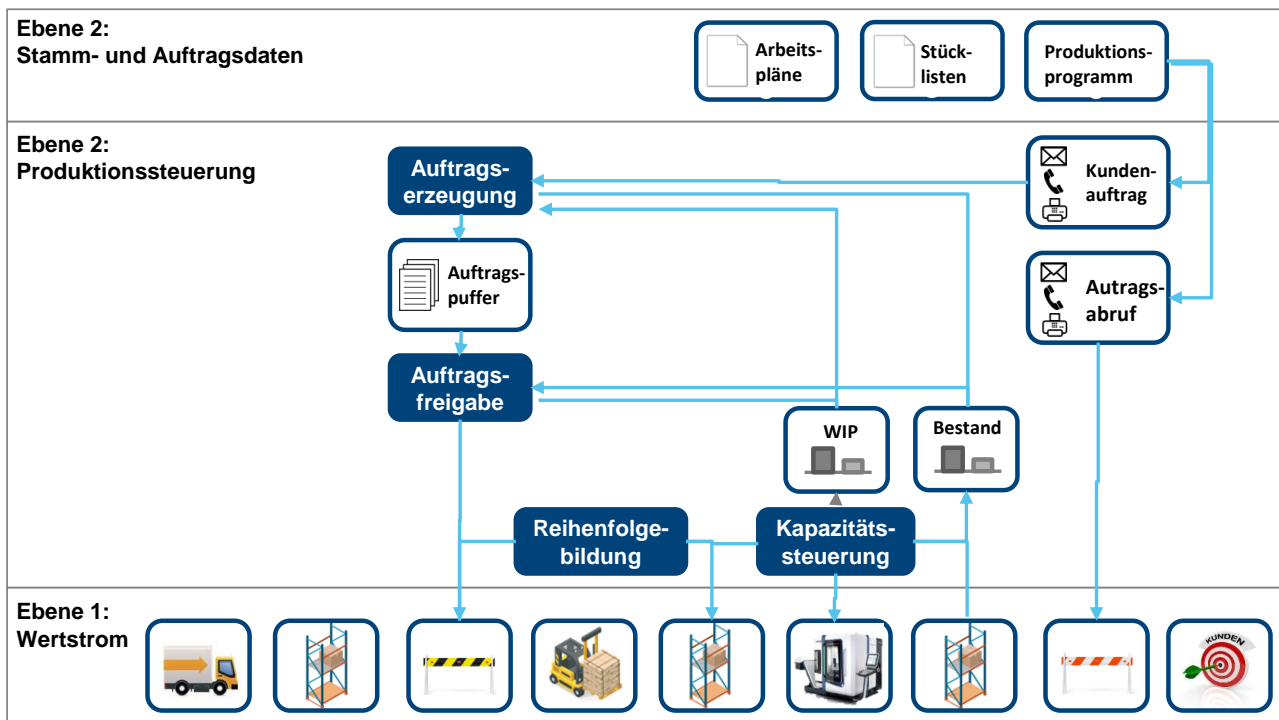


Abbildung 3-7: Konzept der „Wertstromorientierten Produktionssteuerung“ [SCH10]

Die „Wertstromorientierte Produktionssteuerung“ betrachtet dabei die Aufgaben innerhalb der vollständigen Wertschöpfungskette ausgehend von der Ebene des Wertstroms horizontal und in die höheren Gestaltungsebenen (vgl. Abbildung 2-15) vertikal integriert.

²³ Ein Manufacturing Execution System (MES) stellt nach VDI 5600 eine funktionale Ergänzung bekannter ERP-Systeme dar, um alle Fertigungsprozesse zeitnah zu planen und zu steuern die und übergreifende Prozesstransparenz zu erhöhen. [VDI07] (vgl. vertiefend Kapitel 3.4)

Innerhalb der Folgekapitel gilt es, ein wertstromorientiertes Produktionssteuerungskonzept zu entwickeln und mithilfe einer Umsetzungsstrategie in mehrere Ebenen zu implementieren. Die „Wertstromorientierte Produktionssteuerung“ kann daher als grundlegende Ausrichtung der Betrachtungsweise gelten, auf deren Basis **eigenständige Wirkmodelle** in dieser Arbeit entwickelt werden.

3.3.3 Aktuelle adaptive Ansätze

Aufbauend auf der Erkenntnis, dass die genannten konventionellen Verfahren der Produktionssteuerung die aktuelle Situation in der Produktion meist nur unzureichend berücksichtigen (vgl. [UHL15, KLE14]), wurden weiterführende Verfahren entwickelt. Diese Ansätze verfolgen die Zielrichtung, durch eine höhere Ereignisorientierung anpassungsfähiger auf die aktuelle Realität in der Produktion reagieren zu können und schnelle Entscheidungen für die nahe Zukunft zu unterstützen.

Adaption durch Modularisierung

Zur Beherrschung einer steigenden logistischen Komplexität wird in der Literatur der Ansatz zur Modularisierung²⁴ der Produktion vorgeschlagen. Insbesondere bei der Organisation von produktorientierten Fertigungsstrukturen ist diese Art und Weise der Separation von Unternehmensteilen, um Schnittstellen und Abstimmungsaufwand zu reduzieren, beispielsweise durch das Inselprinzip bereits beschrieben (vgl. Tabelle 2-3). Die Verfahren von LOPITZSCH und SEIBOLD beschreiben diese Modularisierung der Produktion und die Integration einer hybriden Fertigungssteuerung für die gebildeten Module einer Serienproduktion. Dabei werden verschiedene Verfahren der Fertigungssteuerung auf die produktorientierten Module kombiniert. Bei SEIBOLD beispielsweise wird die Push- und Pull-Steuerung nach den Grundprinzipien der schlanken Produktion als Hybridlösung konfiguriert (vgl. [LOP05]; [SEI06]; [NEU01]). Der Ansatz der Entkopplung von Modulen und der darauf bezogenen Strukturierung von Ressourcen gilt in vielen Forschungsarbeiten, beispielsweise in der Fabrikplanung, als verbreiteter Lösungsansatz.

Innerhalb der Produktionssteuerung zeigt sich eine Modularisierung meist durch modulübergreifende Planung und Steuerung in einem zentral organisierten PPS-System, das die Ziele in Form von Arbeits- und Terminplänen den entsprechenden dezentralen Modulen²⁵ vorgibt. Die im Abschnitt 3.2.1 erläuterte Feinplanung und –steuerung erfolgt anschließend in diesen Modulen weitgehend autonom, wodurch besser auf dynamische Störungen reagiert werden kann und die Selbstoptimierung im Modul gefördert wird. Diese aus der rein

²⁴ Der Begriff der Modularisierung bezeichnet hier die Gestaltung von Untereinheiten in einem vollständigen (Produktions-)System. Dieses in sich geschlossene Untersystem wird in dieser Arbeit nachfolgend als Modul bezeichnet.

²⁵ Diese dezentralen Module im Kontext der PPS werden auch als Steuerungseinheit oder Steuerungsbe-
reich in der Literatur bezeichnet.

produktorientierten Fertigungsstruktur bekannten Ansätze werden erstmals durch STÜRMANN weiterentwickelt. Hier erfolgt der Steuerungsansatz nicht auf der Basis eines Produktmoduls sondern durch die Bildung eines Prozessmoduls. Dazu bilden Teilprozessketten der Fertigung und Montage der Serienproduktion über Entkopplungspunkte die Grundlage von synchronisiert gesteuerten Modulen. [STÜ12, ENG15, LOP05, WIL14]

Auf diesen Gedanken aufbauend beschreibt ENGELHARDT aktuell die **steuerungsorientierte Produktionsmodularisierung** als *strukturiertes Vorgehen*, mit welchem eine Produktionsumgebung aus der Steuerungssicht in sogenannte Produktionsmodule untergliedert werden kann. Diese Vorgehensweise verwendet bestehende Produktionsstrukturen und gilt damit auch für verrichtungsorientierte Werkstattfertigungen als grundsätzlich geeignet. Die Abbildung 3-8 stellt diesen generellen Ansatz schematisch dar. Die Module sind dabei entkoppelt und werden über geeignete Steuerungsstrategien harmonisiert [ENG15].

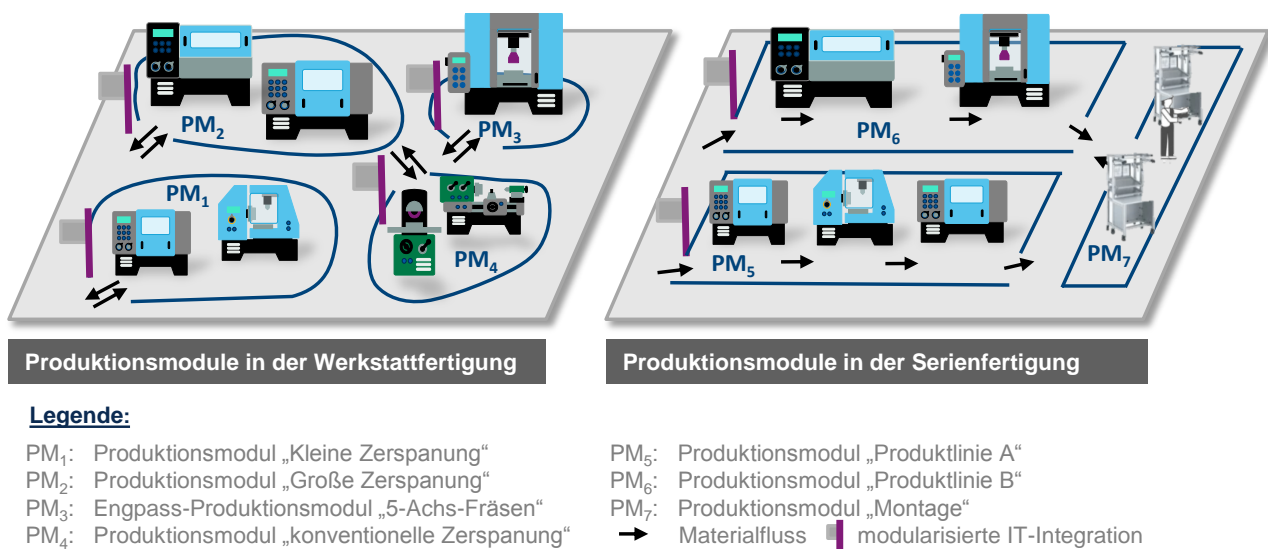


Abbildung 3-8: Steuerungsorientierte Produktionsmodularisierung in Werkstatt- und Serienfertigung [ENG15]

Die steuerungsorientierte Produktionsmodularisierung besteht aus *produktbezogenen*, *ressourcenbezogenen* und *steuerungsbezogenen* Prinzipien, die zur organisatorischen Bildung der dargestellten Module führen. Diese werden eher verallgemeinert als betriebsorganisatorische Kriterien der Modularisierung beschrieben, die im Einzelfall sinnvoll priorisiert und spezifiziert anzuwenden sind. Die Forschungsarbeit nutzt die genannte Basis der Modularisierung als Systemelement für die Referenzarchitektur einer RFID-gestützten²⁶ situationsbasierten Selbststeuerung, bei dem es im Wesentlichen auf die Identifikation der Produkte in den Modulen ankommt. Dieses Prinzip wurde innerhalb der

²⁶ RFID (Radio Frequency Identification) – Systeme sind in der Lage, Daten drahtlos zu übertragen. Sie werden im Informationsmanagement der Produktion zur automatischen Identifikation bzw. dem Austausch von Produktinformationen genutzt (vgl. [OST12]).

Fertigungs- und Montageprozesse der Automobilindustrie validiert, und bisher in der Einzel- und Kleinserienproduktion nicht explizit betrachtet [ENG15].

Die Problematik hoher Komplexität einer Auftragsfertigung in Form von „make-to-order“ oder „engineer-to-order“, die nach einem komplexen Verrichtungsprinzip organisiert ist, wird im Rahmen dieser Ansätze nur am Rande erwähnt. Es wird dabei nicht behandelt wie derartige Prozessmodule in der verfahrenstechnisch verketteten Werkstattsteuerung, bei stark unterschiedlichen Losgrößen und Bearbeitungsumfängen konfiguriert werden, und Umsetzungsmaßnahmen in die betriebliche Praxis entwickelt werden.

Adaptive Selbststeuerung

Der Ansatz einer stärker situationsbezogenen Steuerung durch die Entwicklung von Selbststeuerungsmethoden, bei denen die logistischen Objekte selbst einen Rahmen zur Entscheidungsfindung liefern, ist bekannt [BLU13]. „Das Ziel der Selbststeuerung ist das Erreichen einer höheren Systemrobustheit sowie eine Vereinfachung der Prozesse durch die verteilte Bewältigung von Dynamik und Komplexität in Form von höherer Flexibilität und Autonomie der Entscheidungsfindung“ [SCH12c, S. 657]. Dadurch wird lediglich die Entscheidungsfindung definiert, aber keine Entscheidung getroffen.²⁷

Forschungsarbeiten der aktuellen Wissenschaft beschäftigen sich mit hochauflösender Produktionssteuerung und Selbststeuerungsmethoden auf Basis von sogenannten Cyber-Physischen-Systemen (CPS)²⁸. Diese Systeme bestehen aus Objekten z. B. Produktionsanlagen und Logistikkomponenten, die eingebettete Systeme enthalten und kommunikationsfähig sind. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) fördert die Entwicklung dieser technologischen Grundlagen für die „Innovation der Produktion von morgen“ durch zahlreiche geförderte Projekte, welches die hohe Bedeutung der Übertragung dieser theoretischen Forschung in die betriebliche Praxis verdeutlicht, wobei ein weiterer beträchtlicher Forschungsbedarf zur Steigerung der Effizienz und Intelligenz derartiger Systeme identifiziert wird, die heute einer Verbreitung der Technik entgegen steht (vgl. Übersicht [BMBF15], Projekt-Abschlussbericht „Prosense“ [PRO15]).

Insbesondere der Ansatz einer hochauflösenden Produktionssteuerung, die durch den Einsatz von CPS erreicht wird, wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit näher betrachtet. Eine höhere Informationstransparenz und -verfügbarkeit und eine darauf basierte effektivere Kommunikation innerhalb eines integrierten Produktionssteuerungskonzeptes gilt heute als ein Schlüssel zum Erfolg [BAU14]. Es bleibt dabei aber weitgehend unklar, wodurch und in welcher Umsetzungstiefe eine derartige Strategie, auf die vorliegende Produktion übertragbar ist. Weiterhin wird ein enormer finanzieller und fachlicher Aufwand

²⁷ Vgl. weiterführend BLUNCK [BLU13]; SCHOLZ-REITER [SCH12c]; HÜLSMANN [HÜL07]

²⁸ Cyber-physische Systeme können ihre Umwelt unmittelbar mit ihrer entsprechenden Sensorik erfassen, sie mit Hilfe weltweit verfügbarer Daten und Dienste auswerten, speichern und sie können mit Hilfe von Aktoren auf die physikalische Welt einwirken. [BAU14]

erzeugt, für den die meisten Unternehmen der beschriebenen Branche nicht die notwendigen Voraussetzungen mitbringen.

Vielmehr zeigt sich Potential darin, einzelne Prozessabläufe und Ideen im Kontext dieser genannten Projekte, z. B. die Vernetzung von Wissen zur Steuerung, auf Verwendbarkeit in einem ganzheitlichen Steuerungskonzept zu prüfen. Auch die Nutzung von Sensorik zur Datenaufnahme in Verbindungen mit modernen Methoden des Informationsmanagements wie der Echtzeitkommunikation stellen einen Teilaspekt dar, für den es in einer „Digitalen Werkstattfertigung“ nur vereinzelte spezifische Beispiele (vgl. Projekt „Agilita“ [PAT12]) gibt. Diese Ansätze stellen jedoch kein Steuerungskonzept für die vorliegende Problemstellung dar.

3.3.4 Ansätze und Methoden zur Konfiguration

Aufbauend auf den vier beschriebenen Aufgaben der Fertigungssteuerung (vgl. 2.2.1, 3.1.2), dem logistischen Zielsystem (vgl. 3.1.1) sowie der bereits vorgestellten Verfahren aus den vorangegangenen Abschnitten werden hier Ansätze und Methoden zur Konfiguration eines Steuerungskonzeptes beschrieben.

Damit innerhalb einer Produktion die logistischen Ziele erreicht werden können, genügt es nicht, in einem bestimmten Teilgebiet der Fertigungssteuerung herausragende Ergebnisse zu erzielen. „Vielmehr ist die gesamte Fertigungssteuerung aufeinander abzustimmen und sollte darüber hinaus auch Vorgaben aus der Produktionsplanung sowie die Produkt- und Produktionsstruktur berücksichtigen“. Hierbei ist es nach LÖDDING ferner kaum möglich, eine **optimale Konfiguration** der Fertigungssteuerung zu bestimmen oder auch nur zu definieren. Es gilt durch eine abgestimmte Auswahl von Verfahren eine möglichst konsistente Konfiguration zu erreichen. Diese besteht für jede Aufgabe aus den Schritten der **Verfahrensauswahl**, **Verfahrensparametrisierung** und der **Durchsetzung bzw. Anwendung der Konfiguration** und stellt damit eine **Aufgabenverknüpfung** (vgl. Abbildung 3-9) dar, die LÖDDING weiterführend beschreibt und im Abbildung 2-10 bereits zitierten Modell ergänzt [LÖD08b, S. 529ff.].

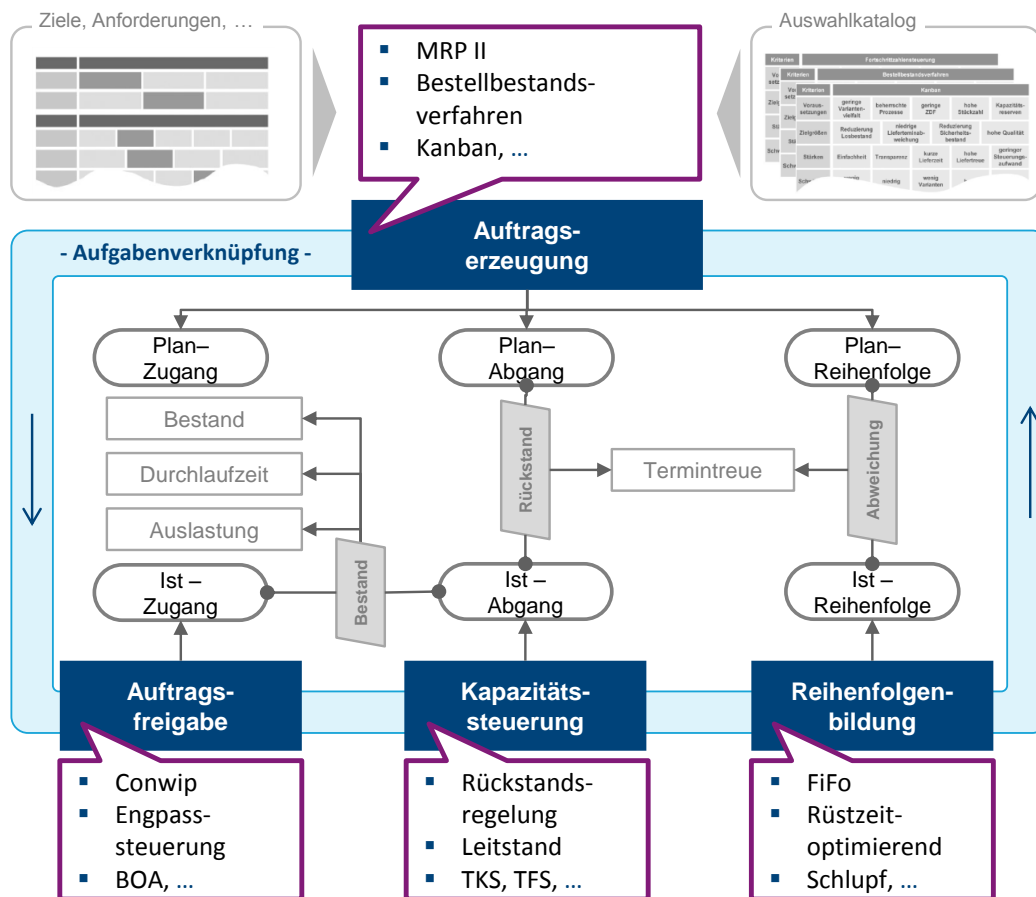


Abbildung 3-9: Konfiguration der Fertigungssteuerung (vgl. [NYH10b, GRI12] zitiert nach [LÖD08a])

Die bisher erläuterten Grundlagen stellen die Basis für die Konfiguration dar. Eine konkrete Weiterentwicklung zur Ausgestaltung eines idealen Fertigungssteuerungskonzeptes zeigt NYHUIS durch die Anwendungsmöglichkeit einer morphologischen Analyse und Bewertung. Mit diesem systematischen und möglichst standardisierten **Auswahlprozess** lassen sich individuelle Verfahrenskriterien und -ausprägungen, die beispielsweise in Form einheitlicher Stärken-/Schwächen-Profile verdichtet werden, im Sinne einer hohen Anforderungserfüllung oder anhand einer bekannten Eignung bewerten und priorisieren. Als Basis dafür dient ein Anforderungskatalog zur Bündelung von Kriterien, wie er z. B. in Tabelle 2-4 dargestellt ist (vgl. [NYH10b], [NYH06]). In der Parameterkonfiguration zur **Verfahrensparametrisierung** kommt es insbesondere auf die wechselseitigen Abhängigkeiten der logistischen Zielgrößen und deren Einflussgrößen an, wozu an dieser Stelle auf die sogenannten *Logistischen Grundgesetze und die Kennlinientheorie* nach WIENDAHL und NYHUIS zur Orientierung verwiesen wird (vgl. [NYH12], [NYH09] und 3.1.1).

„Unerlässlich für ein effizientes Steuerungskonzept ist eine vorherige Analyse der Produktionsstruktur, die Identifizierung von Kunden-entkopplungspunkten und damit das Festlegen von Steuerungsbereichen, für welche eine Fertigungssteuerung konfiguriert werden soll.“ [NYH10b, S. 287]

Es gilt daher, die durch die **Durchsetzung** der Konfiguration angestrebte Zielerreichung im Kontext einer konkreten Produktionsstruktur innerhalb festgelegter Steuerungsbereiche zu überprüfen. Letztendlich bestimmen die Produktionsumgebung und der Prozess entsprechende Fähigkeiten, die gemeinsam mit den Randbedingungen der Produktionsstruktur selbst wichtige Freiheitsgrade für die Konfiguration darstellen und Möglichkeiten entsprechend begrenzen [MÜT09]. MÜTZBERG zeigt dies exemplarisch am Beispiel eines Automobilzulieferers mit einer iterativen und strukturierten Vorgehensweise zur Konfiguration, die in Abbildung 3-10 dargestellt ist.

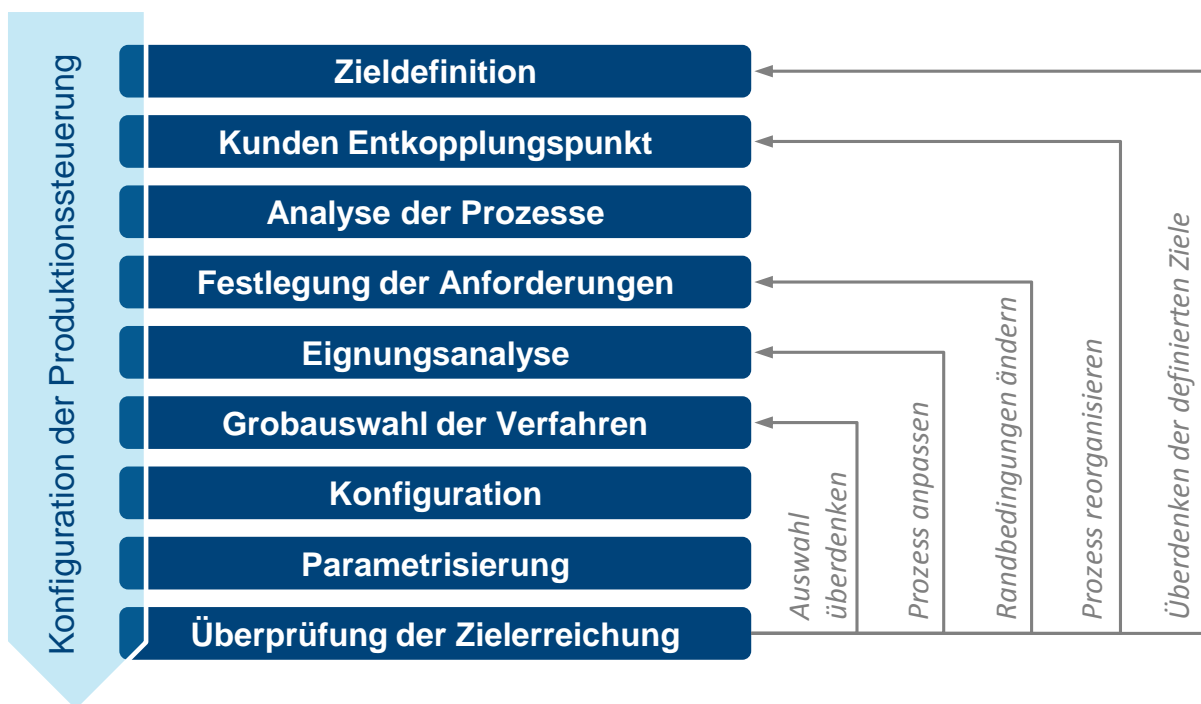


Abbildung 3-10: Iterative Vorgehensweise zur Zielerreichung der Konfiguration [MÜT09]

Mithilfe einer derart strukturierten Vorgehensweise kann prinzipiell für alle Anforderungsprofile eine Konfiguration durchgeführt werden, auch wenn diese in der hier betrachteten betrieblichen Praxis oft nicht bewusst durchgeführt und vor allem durchgesetzt wird. Allerdings weist der aktuelle Entwicklungsstand noch einen zu geringen Grad an Detaillierung und Standardisierung in Bezug auf die Herausforderungen in dieser Arbeit auf, den es weiter zu systematisieren gilt. Die angestrebte ganzheitliche, wertstromorientierte Betrachtungsweise und eine begleitende praxisnahe Umsetzung kann diese Entwicklung damit weiter operational unterstützen.

3.4 Information und Kommunikation

In den vorhergehenden Kapiteln wird bereits die hohe Bedeutung der Information und Kommunikation innerhalb eines Produktionssteuerungssystems beschrieben. Alle im Kapitel 3.4 vorgestellten Verfahren der Produktionssteuerung sind ohne die Informationen über den aktuellen Zustand in der Produktion nicht vorstellbar. Als wesentliche Informationen gelten die Plan- und Rückmeldedaten zu Aufträgen, Ressourcen und Beständen. Innerhalb dieses Kapitels werden daher die für diese Arbeit relevanten IT-Systeme und deren Grundlagen vorgestellt, sowie generelle Prozesse des Informationsmanagements in der Produktionssteuerung beschrieben.

3.4.1 IT-Systeme

Die bisher genannten ERP-Systeme gelten als weit verbreiteter Standard im industriellen Umfeld²⁹. Das in diesem Kapitel vorgestellte Aachener-PPS-Modell (vgl. Abbildung 3-3) spiegelt dabei in der Aufgabensicht die sukzessive Vorgehensweise des MRPII-Verfahrens (vgl. Tabelle 3-2) wieder, auf dem die meisten konventionellen ERP-Systeme beruhen. In zahlreichen Veröffentlichungen werden jedoch auch die Nachteile klassischer ERP-Systeme beschrieben. Als wesentliche Schwächen sind die Vergangenheitsterminierung des Systems, eine sukzessive Planungslogik, ausschließlicher Bezug auf hochdetaillierte Plan-Daten und die starke Streuung der Durchlaufzeiten bekannt (vgl. [WIE97]; [JÄG00]).

Aufgrund der bereits bekannten mangelnden Rückkopplung und der Bestrebung den Situationsbezug und die Transparenz in der Produktionssteuerung zu erhöhen, entwickelten sich weiterführende Systeme. Damit ist nicht nur gemeint, Historisches lückenlos nachvollziehen zu können und daraus Handlungsempfehlungen für die Zukunft abzuleiten. „Transparenz bedeutet heute auch, zeitnah Realitäten zu visualisieren, daraus Schlüsse zu ziehen und den Verantwortlichen Empfehlungen für eine sofortige Abstellung der fehlerhaften Zustände zu vermitteln“ [KLE06, S. 21]. Die Zielrichtung dabei ist, vor allem zufällige Ereignisse und bekannte Engpässe berücksichtigen zu können und die Informationslücke zwischen Unternehmensleit- und Produktionsebene zu schließen. Einen Überblick über die betrieblichen MES-Aufgaben und die der funktionalen Integration gibt die VDI Richtlinie 5600. Die Abbildung 3-11 zeigt die beschriebene Einordnung der MES-Systeme in die Unternehmensebenen (vgl. Kapitel 2.3).

²⁹ Können die Aufgaben der PPS rechnergestützt umgesetzt werden, wird in der Literatur auch von PPS-Systemen gesprochen [ARN08]

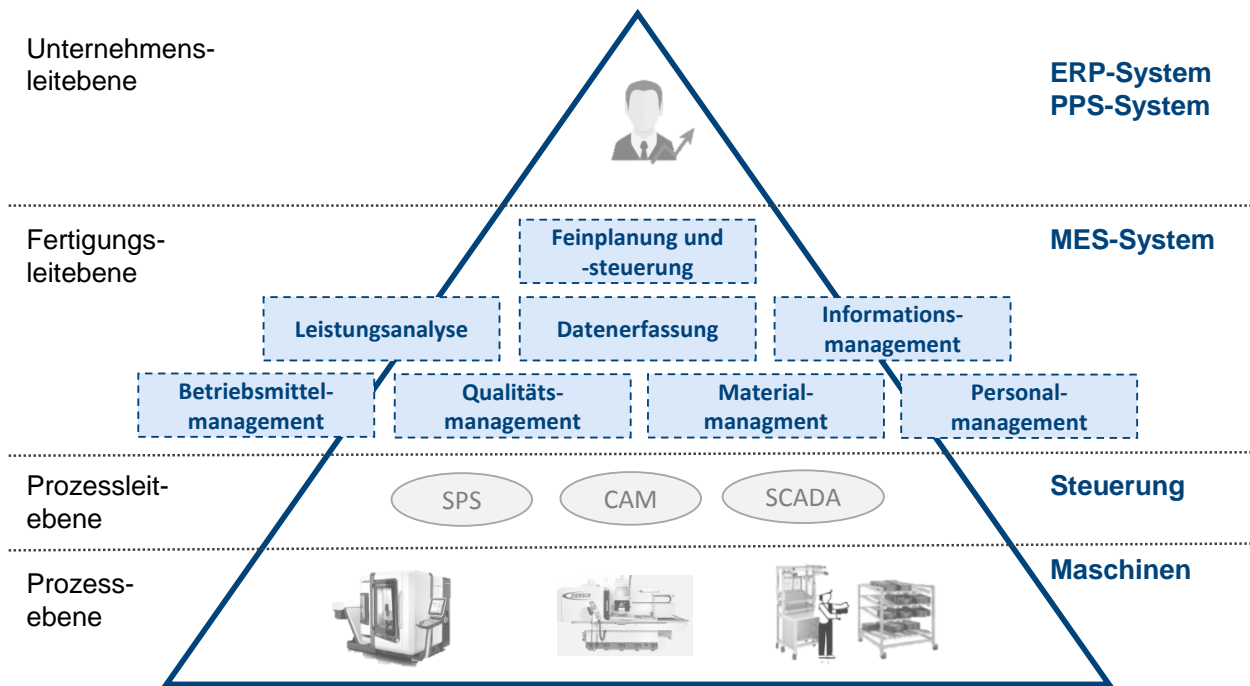


Abbildung 3-11: Einordnung der MES-Ebene im Unternehmen (in Anlehnung an [KRE15]; [VDI07])

Aus der vorangegangenen Abbildung sind die Hauptfunktionen eines MES-Systems zu entnehmen, deren Funktionalität über traditionelle BDE- oder MDE Systeme³⁰ deutlich hinaus geht. Im Gegensatz zu ERP-Systemen sind moderne MES-Systeme direkt an die Automationsebene (Prozessleitebene) angebunden, wodurch das System echtzeitfähig wird. Daten aus dem Produktionsprozess werden in verdichteter Form an das ERP-System weiter gegeben, wodurch künftige Entscheidungen auf Basis aktueller Informationen getroffen werden können [GER11].

3.4.2 IT-Integration der Prozesse

Das Schließen von Informationslücken und die dadurch erreichte Transparenz zeigt im Vergleich mit den Herausforderungen des beschriebenen Steuerungsproblems hohes Potential. Aufbauend darauf wird die Einbindung der IT in die Aufgaben und Prozesse der Produktionssteuerung exemplarisch betrachtet. Dabei wird festgestellt, dass viele Veröffentlichungen die Vor- und Nachteile von verschiedenen Software-Produkten, sowie deren Auswahlprozess und Einführung im Rahmen der im Vorkapitel genannten Kriterien thematisieren. Die IT-Integration zur Steigerung der Funktionalität der Prozesse wird dabei eher allgemein beschrieben. WOCHINGER stellt dazu Lösungsansätze gegenüber, die sich in der Einsatztiefe der verwendeten ERP- und MES- Systeme unterscheiden, um die Funktionalität der Prozesse und die Aufgaben in der Fertigungssteuerung entsprechend zuzuordnen (vgl. [WOC14] und Abbildung 3-12).

³⁰ MDE = Maschinendatenerfassung

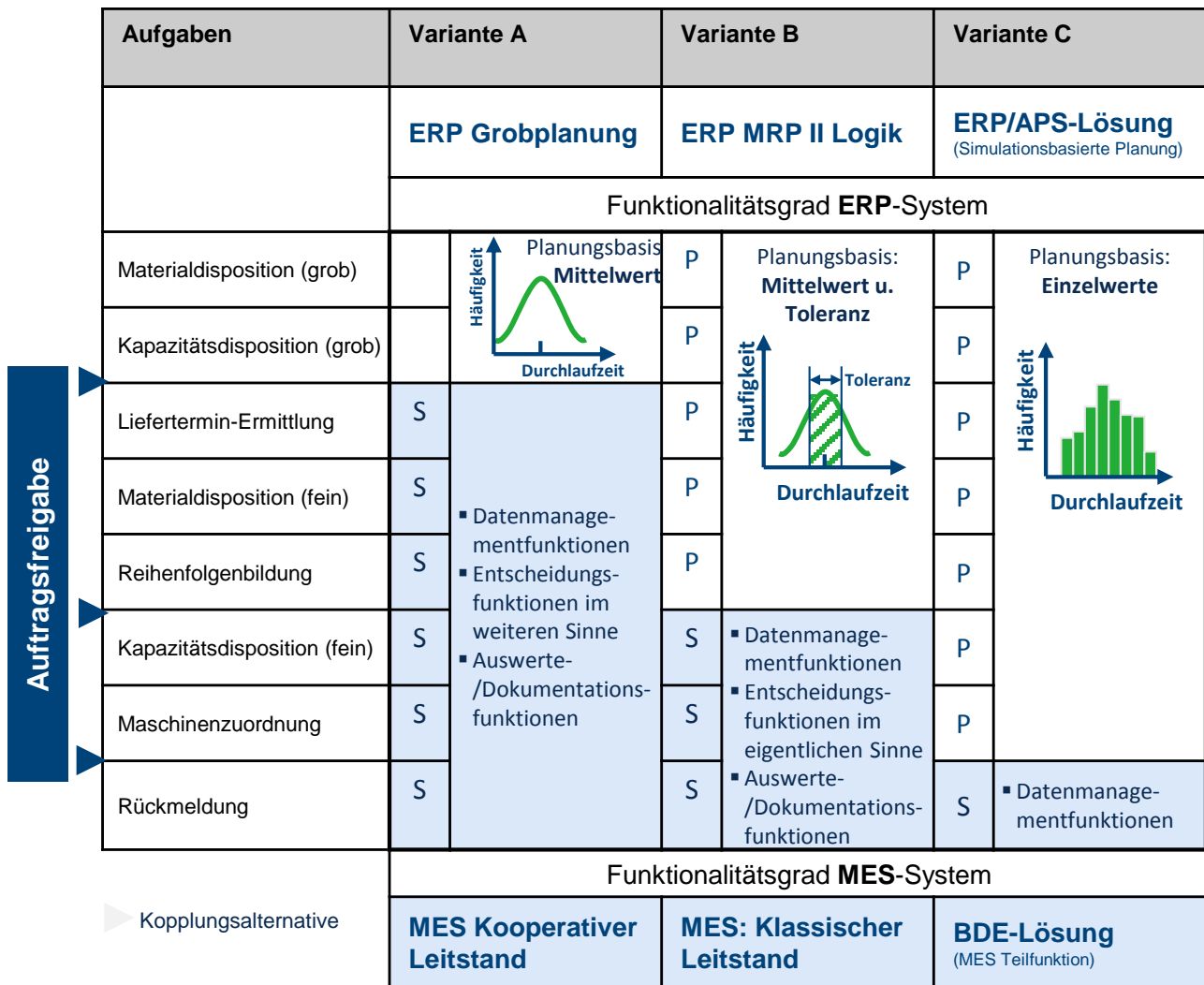


Abbildung 3-12: Alternative Lösungsansätze zur Prozessintegration von ERP und MES [WOC14]

Aus der Gegenüberstellung wird deutlich, dass die Integration eines MES Systems in die Prozesse der Produktionssteuerung in einer unterschiedlichen Prozesstiefe und in Überschneidung mit den eingesetzten Steuerungsverfahren gestaltet werden kann. Obwohl der Einsatz der MES-Funktionalitäten hohes Potential im Rahmen der festgestellten Herausforderungen zeigt, bleibt weitgehend unklar, in welcher Einsatztiefe und Form der Prozessintegration dies erfolgen sollte. GERBERICH unterscheidet eine passive und aktive Ausprägung des MES-Systems. Innerhalb der aktiven Einflussnahme auf die Produktion versteht er die Hilfestellung bei der Aufgabenerfüllung in der Produktionssteuerung. Als passive Ausprägung kann die Informationsbereitstellung zur Unterstützung der Produktionsprozesse, deren Weiterentwicklung und die Unterstützung zur Definition von Planungsparametern gesehen werden [GER11]. Der MES-Ansatz bietet daher in Bezug auf das vorliegende Steuerungsproblem hohes Potential, das entsprechend innerhalb einer ganzheitlichen Konfiguration bewertet werden muss.

3.4.3 Kommunikation

Neben den beschriebenen IT-Grundlagen und der Integration in die Prozesslandschaft kommt der Einbindung in die Kommunikation eines Unternehmens eine hohe Bedeutung zu. BAUERNHANSL beschreibt, „dass wachsende Systemleistung, der Wert der Vernetzung, und die Dezentralisierung und Autonomie“, zum Einsatz von MES- und CPS-Systemen in Zeiten von „Industrie 4.0“ führen, in dem sämtliche Informationen echtzeitnah zur Verfügung stehen, und diese Dienste gemeinsam mit Menschen genutzt werden [BAU14, S. 18]. Der Einbindung in die betriebliche Kommunikation kommt daher eine hohe Bedeutung zu. Nur die Interaktion der an der Steuerung beteiligten Mitarbeiter mit dem System führt letztendlich zum gewünschten Erfolg. Die Abbildung 3-13 zeigt die Funktionen auf ein auf diese Arbeit abgestimmtes Kommunikationsnetzwerk als Grundlage auf.

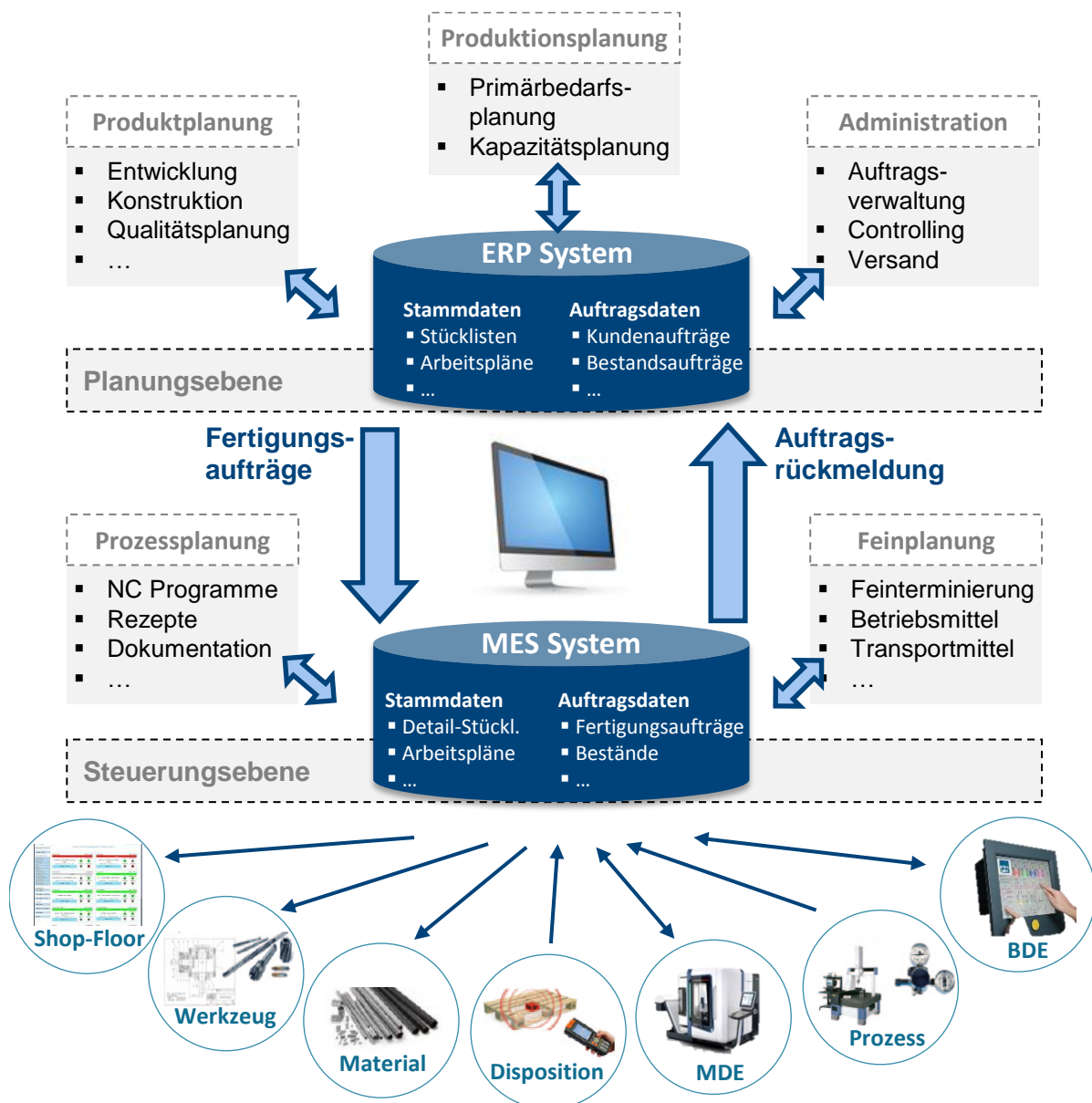


Abbildung 3-13: Funktionsgliederung unter Gesichtspunkten der Kommunikation
(entwickelt aus [WES13]; [KLE14])

Insbesondere die Mitarbeiter müssen im Rahmen eines transparenten und echtzeitfähigen Steuerungssystems in die Lage versetzt werden, als informierter Entscheider die Fülle an gewonnenen Informationen zielgerichtet und situationsadäquat in optimierte Prozesse umzusetzen (vgl. [STE14]). Unter Berücksichtigung der in Abschnitt 2.1.3 vorgestellten Anforderungen an die Mitarbeiter wird das Potential einer verbesserten Entscheidungsfindung und zielgerichteter Kommunikationsprozesse deutlich. In der Literatur existieren wenig konkrete Modelle darüber, wie die Kommunikationsprozesse innerhalb eines Steuerungskonzeptes unter Einbezug der Informationstechnologie und der Prozessabläufe praxistauglich integriert werden. Diese in Abbildung 3-13 aufgezeigte Kommunikation, die durch moderne Werkzeuge wie MES-Systeme unterstützt wird, muss im Steuerungsmodell verankert werden, und kann erst damit zur Steigerung der Transparenz beitragen. Insbesondere durch die Rahmenbedingungen dieser Arbeit, bei denen viele Fertigungsprozesse und Produkte aufgrund der Auftragsfertigung keine technische „Serienreife“ aufweisen, kann diese höhere Informationsqualität nur in Kombination mit dem Mitarbeiter genutzt werden. Für eine derartig hohe Diversität ist die Entwicklung einheitlicher und detaillierter Prozessmodelle kaum möglich. Die Rolle der Fertigungssteuerer, Werker, Meister und sonstiger Prozessverantwortlicher in der Systemumgebung wird in der Literatur zudem eher randständig behandelt (vgl. [BAU14]). Dadurch ergibt sich ein hohes Defizit für die Nutzung eines derartigen Kommunikationsansatzes als Gestaltungsaspekt der Modellierung in dieser Arbeit.

3.5 Integration im ganzheitlichen Produktionssystem

Im Kapitel 3 wurde bisher festgestellt, dass eine wertstromorientierte Ausrichtung der Produktionssteuerung einen sinnvollen Ansatz darstellt. Weiterhin konnten die Vorteile der Flussorientierung, des Pull-Prinzips und verschwendungsarmer Prozesse auch für die funktionsorientierte Werkstattsteuerung erkannt werden. Deshalb werden in diesem Kapitel in kurzer Form die wesentlichen Elemente ganzheitlicher Produktionssysteme, insbesondere für die Klein- und Einzelteillfertigung, betrachtet.

Der im Kapitel 1 bereits erklärte Begriff des „Ganzheitlichen Produktionssystems“ stellt ausgehend vom Toyota-Produktionssystem, und den Prinzipien der „Schlanken Produktion“ (Lean Production) die logische Weiterentwicklung der Produktionssysteme dar. Insbesondere in der Serienfertigung, mit dem Ursprung in der Automobilindustrie und in Großunternehmen, sind diese Produktionssysteme erfolgreich etabliert (vgl. bereits zitierte Literatur [DOM15, OEL00, LIK13, TAK09, WOM91]). Auch im Bereich der Einzel- und Kleinserienfertigung von kleineren und mittleren Unternehmen (KMU) existieren einige Veröffentlichungen, in denen entsprechende Übertragungsstrategien entwickelt werden. GRUSS konzipiert beispielsweise Ansätze zur theoretischen Übertragung des Takt- und Flussprinzips auf Unikat- und Einzelfertiger, wobei der hohe methodische Schwierigkeitsgrad beschrie-

ben wird [GRU10]. MÜLLER beschreibt die Verwendung der Lean Prinzipien in der Werkstattsteuerung. In seiner Arbeit wird die Vielzahl der theoretisch verfügbaren Konzepte beschrieben, und diese als meist zu abstrakt in Bezug auf eine angemessene Praxistauglichkeit eingestuft [MÜL09]. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit relevanten Gestaltungsprinzipien eines ganzheitlichen Produktionssystems sind in Abbildung 3-14 dargestellt.



Abbildung 3-14: Gestaltungsprinzipien ganzheitlicher Produktionssysteme [DOM15]

GRINNINGER verwendet den Begriff der „Schlanken Produktionssteuerung“ in seiner Arbeit und stellt die dazu wesentlichen Kriterien für die Automobilproduktion heraus. Dabei werden die weiter oben genannten Gestaltungsprinzipien in einem vergleichbaren Umfang als Leitsätze für die Konfiguration des Produktionssteuerungssystems in der Fließfertigung des Automobilkarosseriebaus angewandt. Mit dieser Vorgehensweise wurden hybride Kombinationen aus konventionellen Verfahren, die auch innerhalb des Kapitels 3.3 beschrieben sind, entwickelt [GRI12].

Für die verfahrenstechnisch verkettete Werkstattfertigung von Einzelaufträgen ist eine derartige Vorgehensweise bisher nicht bekannt. Eine wertstromorientierte Ausrichtung mit schlanken und verschwendungsarmen Prozessen entlang der Wertschöpfungskette ist auch für die verrichtungsorientierte Produktion ein vielversprechender Leitsatz. Es bleibt dennoch weitgehend unklar, durch welche konkreten Gestaltungsmaßnahmen die in der Literatur (vgl. z.B. [BUL09]) bekannten drei Aspekte des Produktionssystems, das **technische System**, die **Managementinfrastruktur** sowie das **Verhalten und der Mitarbeiter** erreicht werden und wie eine Synchronisierung mit dem Steuerungsmodell funktioniert.

3.6 Abgeleiteter Handlungsbedarf

Im vorliegenden Kapitel wurden die für diese Arbeit relevanten wissenschaftlichen Ansätze vorgestellt und analysiert. Ausgehend von der Zielsetzung und den identifizierten Handlungsfeldern (vgl. Kapitel 1.2 und 2.3), wird im Vergleich mit dem Stand der Technik der Handlungsbedarf abgeleitet. Bei der Analyse des Zielsystems wird deutlich, dass ein auf die Marktziele synchron ausgerichtetes Steuerungsmodell, welches die weiteren Zielgrößen innerhalb des Modells gewichtet, auch für eine hochflexible Auftragsfertigung vorteilhaft ist. Darauf aufbauend wurden die bekannten Methoden und Verfahren unter Berücksichtigung der Herausforderungen aus Kapitel 2 diskutiert.

Die konventionellen Verfahren der Produktionssteuerung können vornehmlich nur einzelne Aufgaben unter einer zu geringen Ereignisorientierung und ohne Berücksichtigung der gegenwärtigen Produktionssituation ausführen. Die Kapazitätsauslastung ist gerade in der verfahrenstechnisch verketteten Werkstattfertigung sehr heterogen. Keines der konventionellen Steuerungsverfahren kann die vollständige Integration der Aufgaben der Produktionssteuerung leisten. Sie bilden jedoch die Grundlage für viele adaptive Verfahren, die versuchen das Defizit einer mangelnden Ereignisorientierung auszugleichen. Die weiterführend erläuterte Modulbildung unter Nutzung hybrider Steuerungsverfahren wird heute größtenteils für produktorientierte Fertigungsstrukturen angewandt. Einige Verfahren der adaptiven Selbststeuerung basieren auf den Ansätzen der Modularisierung und komplexer IT Integration anhand von Simulation und Multiagentensystemen, die in der Industrie bisher aufgrund fehlender Rahmenbedingungen keine weite Verbreitung gefunden haben. Das Komplexitätsniveau der Produktionsstrukturen, das im Rahmen dieser Forschungsprojekte betrachtet wird, ist dabei deutlich geringer als das in der Ausgangssituation dieser Arbeit beschriebene. Wenngleich derart komplexe theoretische Modelle im Rahmen dieser Arbeit aufgrund einer geringen Umsetzbarkeit in den Praxisbetrieb nur randweise behandelt werden, zeigen Teilaspekte weiterführendes Potential. Eine höhere Informationstransparenz durch Digitalisierung und schnelle Entscheidungswege helfen Komplexität zu beherrschen, wobei konkrete Methoden zur Integration im Steuerungsmodell entwickelt werden müssen, um diese Vorteile für das vorliegende Steuerungsproblem zu nutzen.

Es wird festgestellt, dass die vorgestellten Verfahren eine zeitgemäße Grundlage für diese Arbeit darstellen, jedoch deren Anforderungen nicht ausreichend erfüllen. Zwar existieren allgemeine Ansätze zu wertstromorientierten Steuerungsverfahren, jedoch bleibt eine exakte Konfiguration dieser Systeme weitgehend offen. Keines der vorgestellten Verfahren ist für sich betrachtet in der Lage, die Zielsetzung dieser Arbeit im Rahmen einer ganzheitlichen Verbesserung unter Steigerung der Wertstromorientierung und der Erhöhung der Planungs- und Steuerungstransparenz in den Gestaltungsebenen zu erreichen.

Obwohl nach einer aktuellen Studie (vgl. [MEI15, SCH15]) 72,6 Prozent der befragten Unternehmen die Zukunft der PPS in dezentralen echtzeitfähigen Systemen sehen, verfügen

heute zwischen 55-65 Prozent der kleineren und mittleren Unternehmen noch nicht über ein BDE- oder MDE-System, und damit nicht über die entsprechenden Grundvoraussetzungen für noch modernere Systeme. Auch innerhalb der Branche der Komponentenzulieferer von Sinterbauteilen sind sowohl der Reifegrad der Produktionssysteme als auch hochauflösende IT-Werkzeuge deutlich geringer entwickelt als beispielsweise in der Automobilindustrie oder der industriellen Großserie. Das liegt einerseits an der hohen technischen Komplexität (vgl. Kapitel 2), dem methodischen und finanziellen Einführungsaufwand, und dem Defizit an praktischen Umsetzungsmethoden für die beschriebene komplexe Produkt- und Produktionsstruktur. Derartig integrierte Beispiele existieren bisher nicht.

Der beschriebene Stand der Technik zeigt, dass ein hohes Potential in der Entwicklung eines auf die **verfahrenstechnisch verkettete Werkstattfertigung zugeschnittenen Steuerungsmodells** besteht. Die modellhafte Konfiguration eines Steuerungsverfahrens und die Maßnahmen zur Implementierung in das beschriebene Umfeld müssen dazu entwickelt werden. Dazu bietet sich die wertstromorientierte Produktionssteuerung im ganzheitlichen Produktionssystem an, um die Zielsetzung einer generellen Betrachtungsweise zu erfüllen. Aus diesem Grund ist es erforderlich, Methoden zu entwickeln, mit denen sich ein übergeordnetes Pull-Prinzip und eine entsprechende Fluss- bzw. Taktorientierung in der komplexen Prozesskette erreichen lassen. Möglicherweise bietet sich dazu der Gedanke der Modularisierung an, um mit einem adaptiven Ansatz die Komplexität der gesamten Prozesskette zu reduzieren. Dies setzt die Entwicklung eines prozessorientierten Modularisierungsansatzes, sowie einer Entkopplungs- und Synchronisierungsstrategie voraus. Hierzu ist es notwendig, die konventionellen Steuerungsverfahren hinsichtlich ihrer Eignung innerhalb eines derartigen Ansatzes zu analysieren.

Weiterer Handlungsbedarf ergibt sich durch die Integration dieses Steuerungsmodells in ein abgestimmtes IT-System und der Kopplung der Ausführungs- mit der Lenkungsebene. Um dies zu erreichen, gilt es bekannte systemische Grundlagen zu analysieren und gezielt innerhalb eines neuen Steuerungsansatzes weiterzuentwickeln. Hierbei sind die Einflüsse hochauflösender Produktionsdaten und verbesserter Stammdatenqualität zu bewerten um die hohe Diskrepanz zwischen Planung und Steuerung zu minimieren. Ein abgestimmter Prozess zwischen Grobplanung – Feinplanung – Feinsteuerung kann auf dieser Basis erst konzipiert werden.

Dies rechtfertigt die Entwicklung einer weiterführenden Vernetzungsstrategie. Eine Vernetzung des wertstromorientiert konfigurierten Modells mit dem IT-System, der spezifischen Produktions- und Verfahrenstechnik, und der Rollenverteilung der wesentlichen Mitarbeiter zeigt Potential zur Stabilisierung und Transparenzsteigerung. Weiterhin entsteht anhand eines geschlossenen Zielbildes in einem entsprechenden Kennzahlensystem **hohes logistisches Leistungspotential**.

4 Konzeptentwicklung des Steuerungsmodells

Gemäß der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit wird in diesem Kapitel ein ganzheitliches Steuerungsmodell entwickelt, das die Wirkzusammenhänge der wertstromorientierten Produktionssteuerung für die Auftragsfertigung komplexer Teile aus Sinterwerkstoffen exemplarisch erklärt. In diesem Zusammenhang werden zunächst die Anforderungen an ein **ideales Steuerungsmodell** zusammenfassend identifiziert und dargestellt. Mithilfe eines Vorgehensmodells erfolgt die Entwicklung einer Auslegungsrahmenstruktur, die gemeinsam mit der Umfeldanalyse die Grundlagen für die Konzeptentwicklung legt. Daraus wird in Kapitel 4.3 der allgemeine **Konfigurationsansatz** zur Modellbildung abgeleitet, worauf aufbauend das Steuerungsmodell entworfen wird. Eine Detaillierung erklärt nachfolgend die im Steuerungsmodell identifizierten Konzeptelemente und beschreibt die Möglichkeiten der Adaption vor dem Hintergrund einer nachfolgend geplanten Umsetzung.

4.1 Anforderungen an das Steuerungsmodell

Die inhaltlichen Anforderungen an das Steuerungsmodell leiten sich aus der Zielsetzung dieser Arbeit, den beschriebenen praxisbezogenen Herausforderungen im Gestaltungsbereich und dem theoretischen Handlungsbedarf ab, der im Vergleich mit dem Stand der Technik ermittelt wurde. Die Identifikation dieses Anforderungskataloges stellt damit eine Zusammenfassung der bisherigen Abhandlung dar und bildet die Ausgangssituation für die theoretische Modellierung in diesem Kapitel.

Formale Anforderung an das Modell ist eine möglichst hohe Übereinstimmung mit der Praxis bei einem gleichzeitig vertretbaren Aufwand für die Entwicklung. Im Kapitel 5 werden das Modellverhalten und die Anwendbarkeit für den ausgesuchten Produktionsbereich unmittelbar in der Produktion überprüft. Dies ermöglicht auch eine Rückkopplung auf die Strukturen, Elemente und Prozesse im Modell und identifiziert weiterführende Potentiale und somit Optimierungsmöglichkeiten.

Die Abbildung 4-1 zeigt die wesentlichen Punkte der Analysenphase aus den Vorkapiteln und die Überleitung zur Modellentwicklung.

Anforderungen aus der ANALYSEPHASE



Abbildung 4-1: Anforderungen aus der Analysephase

Die Modellentwicklung bildet den Übergangsbereich zwischen dem Analyse- und Gestaltungsphase. Die im weiteren Verlauf dieses Kapitels beschriebenen vertiefenden Analysen werden hierbei der Modellbildung zugeordnet.

4.2 Phasen der Modellentwicklung

Das Kapitel 4.2 stellt die grundlegenden Phasen vor, auf deren Basis in den Folgekapiteln die Entwicklung des Steuerungsmodells erfolgt. Dazu werden die verwendeten Begriffe definiert und eine Auslegungsrahmenstruktur entwickelt. Eine weitere Grundlage der Konzeptentwicklung ist die Umfeldanalyse, die eine spezifische Analysemethodik und abgestimmte Werkzeuge beinhaltet.

4.2.1 Begriffe

Bei der Entwicklung, Detaillierung und Umsetzung des Steuerungsmodells werden spezifische Begriffe verwendet, um die einzelnen Aspekte in der Vorgehensweise zu strukturieren. Die Tabelle 4-1 führt in diese definierten Begriffe ein, um die methodischen Handlungsfelder, Betrachtungsbereiche und Sichtweisen im weiteren Verlauf dieser Arbeit differenzieren zu können.

Tabelle 4-1: Begriffe der Konzeptentwicklung

Begriff	Definition
Gestaltungsbereich	In Kapitel 2.3 eingegrenzter Bereich für die Analyse, Gestaltung und Umsetzung in dieser Arbeit.
Auslegungs- rahmenstruktur	Beschreibung aller Teilaspekte und Betrachtungsgrenzen der Auslegung und Modellierung des Steuerungskonzeptes.
Umfeldanalyse	Beschreibung der zur Lösungsfindung durchgeführten analytischen Vorgehensweise sowie verwendete spezifische Analysewerkzeuge und -methoden innerhalb des vollständigen Gestaltungsbereichs.
Phasenkonzept	Beschreibung der detaillierten Vorgehensweise und Phaseneinteilung im Prozess zur Lösungsfindung des Modellansatzes und dessen Verifikation.
Gestaltungsobjekte	Wesentliche Prozesse des Material- und Informationsflusses, auf die der Modellansatz Auswirkungen hat.
Gestaltungsfeld	Teilaspekt der Konzipierung innerhalb der Gestaltungsobjekte als wichtiger Bestandteil im Produktionssystem.
Verfahrensbausteine	Wissenschaftlich bekannte Verfahren und Methoden zur Erfüllung von Aufgaben und Prozessen in der Produktionssteuerung.
Modul	Abgegrenzte steuerungsorientierte Gruppierung innerhalb der Prozesskette mit eindeutiger Zuordnung von Ressourcen, Prozessen und Informationen.
Konzeptelement	Baustein innerhalb des gesamten Steuerungsmodells, der eine bestimmte Funktionalität im Gesamtkontext der Konfiguration wahrnimmt.

Die vorgestellten Begriffe sind nur teilweise in der Literatur (vgl. [KIE11]) genannt, werden bisher aber nicht in dieser Gesamtheit zur Konfiguration eines Produktionssteuerungssystems verwendet. Die festgelegten logischen Zusammenhänge werden in den Folgekapiteln im Detail beschrieben.

4.2.2 Phasenkonzept

Um den in Kapitel 1 beschriebenen Aufbau dieser Arbeit weiter zu vertiefen, wird an dieser Stelle ein Phasenkonzept (vgl. Abbildung 4-2) zur Konzeption und Verifikation des Steuerungsmodells vorgestellt. Dabei handelt es sich um eine inhaltliche und methodische Strukturierung, die innerhalb der Konzeptentwicklung als Leitfaden herangezogen wird.



Abbildung 4-2: Phasenkonzept

Die Phase 1 beschreibt als Teil des Vorkapitels die Einordnung in das relevante Zielsystem und leitet Unterziele ab. Innerhalb der Phasen 2 und 3 erfolgt die Beschreibung der wesentlichen Grundlagen der Modelltheorie unter Betrachtung der spezifischen Vorgehensweise und der vorliegenden Rahmenbedingungen. Den Kernbereich des Phasenkonzeptes stellt die Modellentwicklung und Konfiguration des Steuerungsmodells dar, das durch die Phase 4 beschrieben wird. Aus dieser Modelltheorie heraus wird in Phase 5 eine Detaillierung und Adaption des Steuerungsmodells beschrieben, um die relevanten Teilaspekte der vielschichtigen Produktion zu beschreiben. Dadurch kann die Grundlage für die Entwicklung von Umsetzungsmaßnahmen und einer darauf folgenden Bewertung des Modells durch Implementierung in Phase 6 gelegt werden.

4.2.3 Auslegungsrahmenstruktur

Die Auslegungsrahmenstruktur grenzt den Umfang und die Rahmenbedingungen der nachfolgenden konzeptionellen Entwicklung in einer Art „Bilanzraum“ ein. Dazu werden der Wertstrom und die Prozesse der PPS durch den Material- und Informationsfluss zusammengeführt, um im Vergleich mit den weiter oben zusammengefassten Anforderungen eine Vorgehensweise zur Lösungsfindung herzuleiten. Die Abbildung 4-3 stellt die bisher entwickelte Ausgangsbetrachtung für die Modellierung dar. Der Informationsfluss und der Materialfluss sind die **Gestaltungsobjekte** innerhalb der Auslegungsrahmenstruktur. Der Materialfluss kann jedoch aufgrund der fixierten verfahrenstechnischen und organisatorischen Rahmenbedingungen der Produktion in Bezug auf die Veränderung des Fertigungsprinzips oder z. B. das Versetzen komplexer Anlagen nur eingeschränkt gestaltet werden.

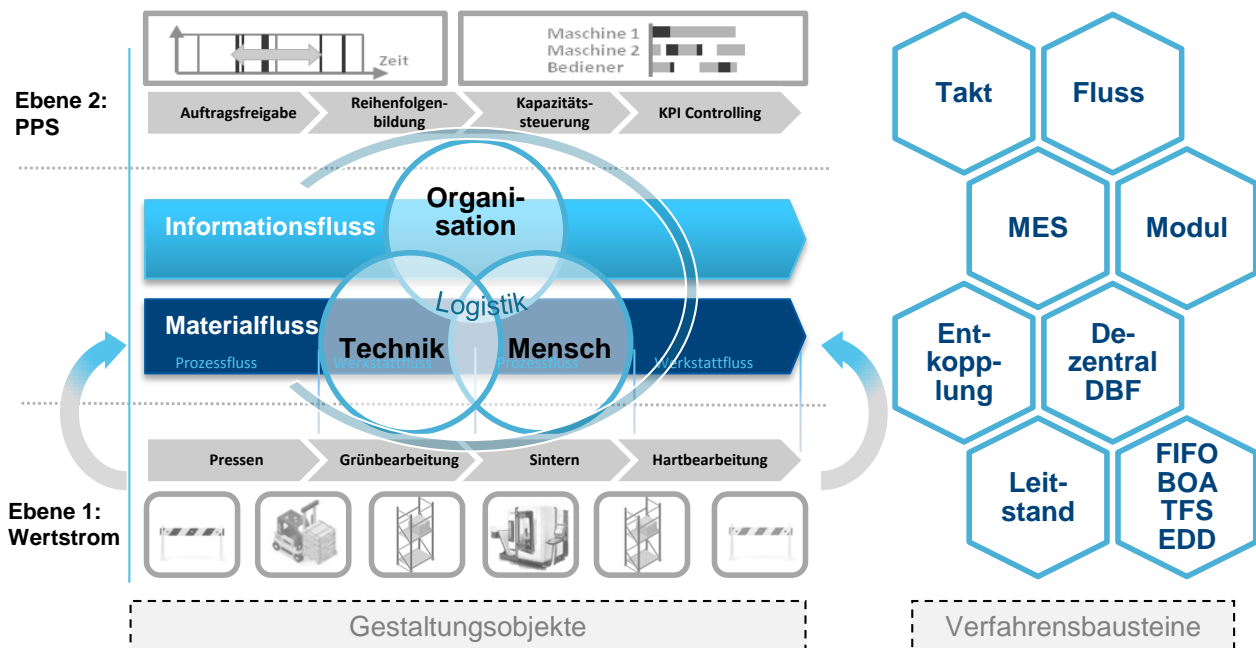


Abbildung 4-3: Auslegungsrahmenstruktur

Innerhalb der Abbildung 4-3 wird mit Pfeilen die Verbindung der technologischen Prozesskette im Wertstrom mit dem Gestaltungsobjekt Materialfluss verdeutlicht dargestellt, dem alle entsprechenden Arbeitssysteme zugeordnet werden können. Die Darstellung zeigt damit, dass sowohl der Informations- als auch der Materialfluss im Rahmen des Steuerungsmodells konzeptionell zu gestalten sind.

Die Teilaspekte der Gestaltung wie z. B. der Materialtransport oder Steuerungs- und Rückmeldeabläufe erfolgen in den **Gestaltungsfeldern** der Organisation, der Technik und des Menschen. Die Auslegungsrahmenstruktur wird durch die dargestellten Prozesse und Aufgaben der PPS vertikal begrenzt. Darüber hinaus sind **Verfahrensbausteine** Teil der Betrachtung, die im bisherigen Verlauf der Arbeit als vorteilhaft für die Lösungsentwicklung identifiziert wurden.

Aus den Kriterien der Auslegungsrahmenstruktur wurden folgende Leitsätze für die Konfiguration, Anwendung und Bewertung des Steuerungsmodells formuliert:

- Der Modellierungsansatz erfolgt auf Basis von übertragenen Informationen des Wertstroms und gilt damit als induktiver Ansatz (vgl. Abbildung 4-3).
- Die hohen Freiheitsgrade der vorhandenen Produktionssteuerung werden durch strukturelle Veränderungen in der Ausführungsebene teilweise fixiert.
- Deutlich weniger definierte Eingriffspunkte werden künftig durch eine übergreifende Steuerung berücksichtigt.
- Durch das Modell können Handlungsempfehlungen für Optimierungsmaßnahmen von Material- und Informationsfluss abgegeben werden, womit sich durch Umsetzung eine Verbesserung des Ziel-Wertstroms einstellt.

4.2.4 Umfeldanalyse

Die Umfeldanalyse stellt eine gesondert zu betrachtende Grundlage in dieser Arbeit dar. Die im Kapitel 2 beschriebenen Rahmenbedingungen der Produktion von Sinterbauteilen verdeutlichen das. Ausgehend von dynamischen Technologiemarkten entstehen kunden- und auftragsspezifische Produkte mit komplexen geometrischen und verfahrenstechnischen Anforderungen. Daraus leitet sich ein Produktionsprogramm ab, welches lediglich über einen längeren Zeitraum qualitativ betrachtet werden kann, um Veränderungstendenzen zu erkennen. Infolge dessen steigt die Komplexität und Varianz voneinander abhängiger Produktions- und Verfahrensparametern derart an, dass diese im praktischen Umfeld nicht ohne Weiteres mit herkömmlichen Wertstromanalysen (vgl. Anwendungsbeispiele in der Literatur [ERL10], [ERL13], [KLE14]) bestimmt werden können. Die Auswirkungen der beschriebenen Variationsbreite und einer gewachsenen Struktur in der Kombination mit ungenauen Systemen zur Betriebsdatenerfassung ergeben im ERP-System eine unzureichende Datenqualität.

Die Abbildung 4-4 führt daher an dieser Stelle in die verwendete Analysemethodik ein und beschreibt weiterführende Analysewerkzeuge, die zur Findung von Lösungsansätzen im Rahmen der Modellierung verwendet werden. Die Vorgehensweise bei der Umfeldanalyse wurde dazu an die definierte ganzheitliche Betrachtungsweise (vgl. Kapitel 2.3), die eine Kernmethodik dieser Arbeit ist, angepasst.

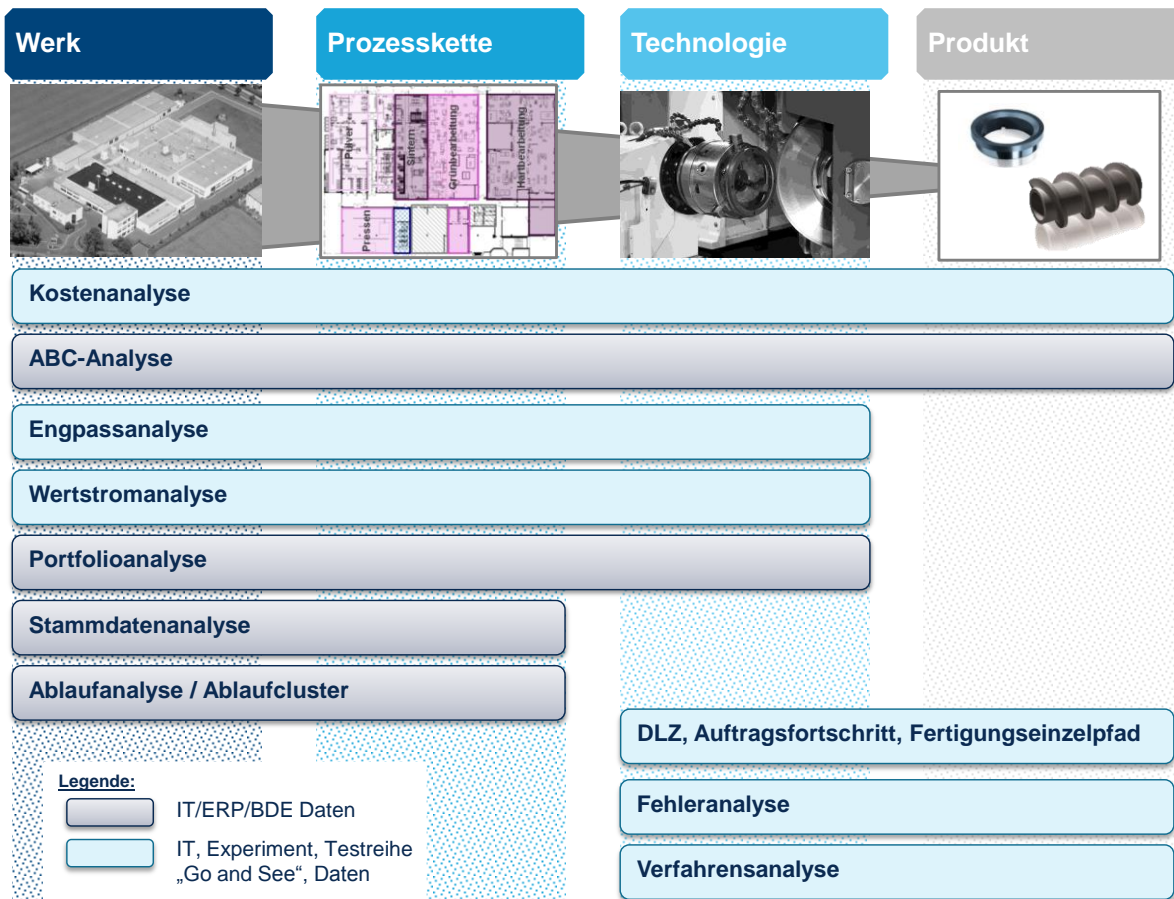


Abbildung 4-4: Struktur der Umfeldanalyse³¹

In der Literatur (vgl. [WAN08], [ERL10], [BRÜ08]) besteht Einigkeit, dass zielgerichtete IST-Analysen unabdingbare Voraussetzungen für die Verbesserung einer Produktion sind. Dabei werden meist zwei unterschiedliche Herangehensweisen beschrieben. Einerseits durch eine **möglichst vollständige Datenaufnahme** mit detaillierten Ergebnissen aus vielen Perspektiven, die methodisch zunächst nicht in einem Zusammenhang stehen. Andererseits durch eine **möglichst weit integrierte Darstellung** aller Produktionsabläufe in Form einer Übersicht nach dem Flussprinzip, z. B. durch eine klassische Wertstromanalyse. Während der detaillierten Umfeldanalyse wurde erkannt, dass ein analytischer Erkenntnisgewinn nur durch die Kombination dieser beiden Ansätze erreicht werden kann.

Aufgrund unterschiedlicher Bearbeitungsarten und -zeiten, sowie dem Verhältnis von Prozess- und Logistikzeiten zwischen den Bereichen der mechanischen Bearbeitung und dem verfahrenstechnisch geprägten Bereich Sintern entsteht ein komplexes Netzwerk, welches durch die Anwendung der weiter oben vorgestellten Analysestruktur interpretierbar wird. Der Gedankengang, anhand der Systemebenen unter Berücksichtigung von hierarchieübergreifenden Daten ein interpretierbares analytisches Netzwerk zu schaffen, wurde aus einem allgemeinen Beitrag von NYHUIS zur „Wandlungsfähigkeit“ (vgl. [NYH10a]) entwickelt. Die Analysewerkzeuge werden dazu auf alle Systemebenen angewandt, wodurch

³¹ Erweitert aus BRACHT, ARZBERGER, SCHULENBURG (vgl. [BRA15]).

eine Datenstruktur entsteht, die mehrere Perspektiven und damit Handlungs- und Entscheidungsebenen darstellt. Um dieses Zusammenwirken der beschriebenen Sichtweisen zu erkennen, wurde wiederum mit der Wertstromperspektive gearbeitet. Unter Anwendung der beschriebenen Analysestruktur in methodisch angeleiteten und betreuten Projekt- und Studienarbeiten sowie einer Diplomarbeit (vgl. [HÄF13]) sind über einen Zeitraum von 2 Jahren einige Millionen Datensätze aus den Betriebsdaten und den Datenbanken des ERP-Systems zu Artikeln, Stammdaten und Kosten ausgewertet worden. Einen weiteren Analysebereich stellen diejenigen Daten dar, die durch begleitende Durchlauf-Experimente, Versuche, Prozess-Istwert-Aufnahmen und durch Beobachtung „vor Ort“ in der Produktion manuell erzeugt wurden (vgl. Abbildung 4-4).

Die beschriebene Vorgehensweise wird durch ein Analysebeispiel, das in Abbildung 4-5 dargestellt ist, vereinfacht erklärt. Dazu wird im ersten Schritt eine Datenbank aller Auftragsdaten gebildet. Diese Datenbank erhält sowohl Informationen aus der Prozesskette, der Technologie und des Produktes. Nachdem die Bildung von Produktgruppen aufgrund der beschriebenen Heterogenität des Produktionsprogrammes nicht möglich ist, wurden Ähnlichkeitsuntersuchungen durchgeführt. Dabei konnte festgestellt werden, dass innerhalb von mehr als 2000 verschiedenen Auftragsablaufvarianten der verrichtungsorientierten Produktionskette, **Ähnlichkeiten** vorliegen. Auf Basis dieser Erkenntnis ist es möglich, entsprechende „**Ablauf-Cluster**“ zu bilden, die „quasi isoliert“ in Versuchen untersucht wurden.

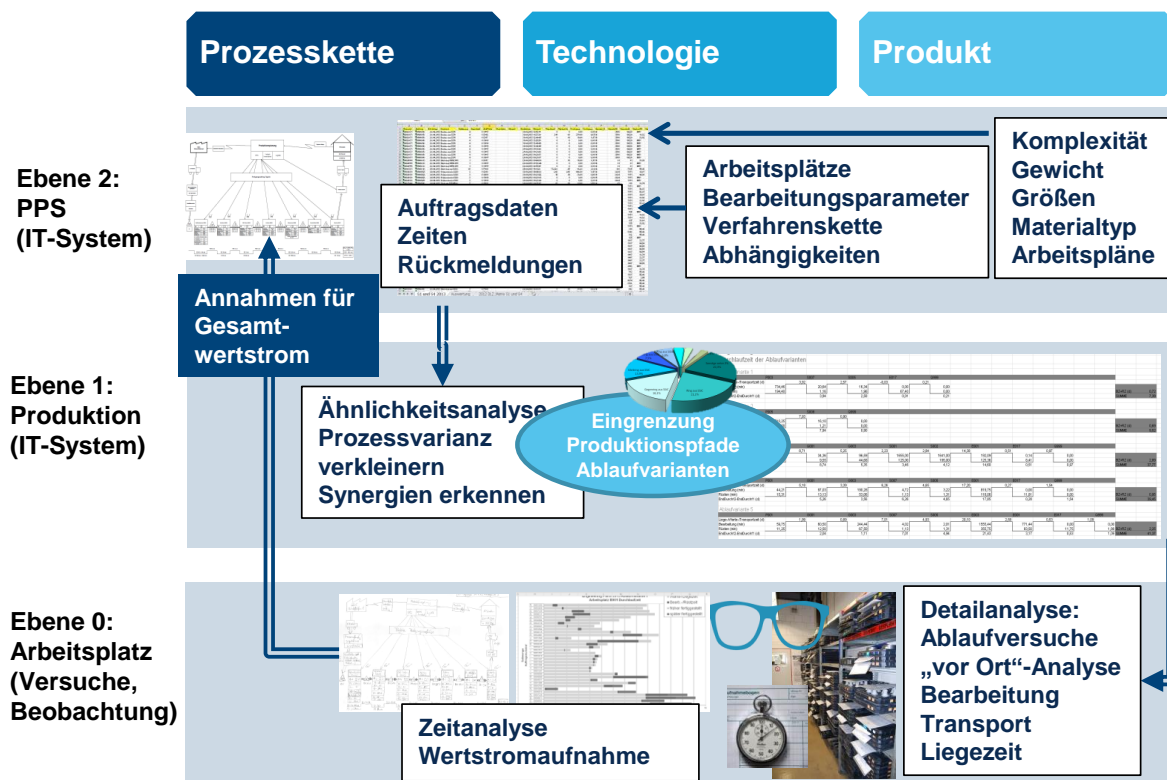


Abbildung 4-5: Analysebeispiel

Aus dem Analysebeispiel wird ersichtlich, dass Wertstromaufnahmen von Teilwertströmen in der „Ebene 0“ möglich sind. Die logische Verbindung von vergleichbaren Analysen lässt dabei Annahmen zu, um den Gesamtwertstrom als Momentaufnahme aus verschiedenen Perspektiven zu erkennen und daraus logische Schlussfolgerungen zu ziehen. Die in der Literatur bekannte Vorgehensweise der Kundenbedarfsanalyse, Bildungen von Produktclustern und Überführung in ein Taktmodell (vgl. [ERL10]) ist für dieses Steuerungsproblem nicht anwendbar. Dennoch zeigen umfangreiche Analysen in mehreren Betrachtungsebenen, dass mit dem gewählten Ansatz, das Produktionssystem, Engpassprobleme und Auswirkungen von Produkt- und der Nachfrageschwankungen verständlich werden. Diese zeigen in der Aufnahme des Modellumfeldes das Optimierungspotential durch das Zusammenwirken der einzelnen Prozessschritte und deren untergeordneten Bearbeitungsmöglichkeiten.

Durch die in diesem Kapitel vorgestellte Vorgehensweise wird gezeigt, wie eine Umfeldanalyse des komplexen Netzwerkes einer realen Produktion methodisch betrachtet und in eine übergreifende Darstellung zusammengefasst wird. Dies stellt allerdings nur einen Ausschnitt der Analysearbeiten dar, um in der Gesamtstruktur die Zusammenhänge zu erkennen und dadurch Schlussfolgerungen zu ermöglichen. Für konkrete Beispiele der Analysen und den entsprechenden Teilergebnissen und Statistiken sei an dieser Stelle an Anhang B verwiesen.

4.3 Modellentwicklung

Um die Idealisierung der Tätigkeiten, Prozesse und Entscheidungswege einer Produktion für Sinterbauteile möglichst umfassend abzubilden, ist eine geeignete Modellbildung erforderlich. Aus den im Kapitel 4 bisher zusammengefassten Grundlagen leitet sich der Modellierungsansatz einer übergreifenden Methodik ab, die plausible Entscheidungen ermöglicht und mit zielgerichteter Konfiguration die logistischen Kenngrößen signifikant verbessern kann. In diese Art der Modellbildung fließen nach BRACHT „physische Aspekte der Fabrik einschließlich der produktspezifischen Eigenschaften, logistische Abläufe und technische Prozesse, aber auch nicht physische Aspekte wie Organisationsstrukturen, Geschäftsprozesse oder vorhandenes und genutztes Wissen“, ein [BRA11, S. 80]. Die Gesamtheit dieser Aspekte wurde hier bereits im Rahmen der Auslegungsrahmenstruktur betrachtet.

Aus der allgemeinen Zielsetzung zur Steigerung von Effizienz und Geschwindigkeit leiten sich für den Modellansatz dabei folgende zu erzielende Verbesserungen ab:

- Erhöhung der Transparenz in Material- und Informationsfluss
- Komplexitätsreduktion
- Erhöhung der Flexibilität im Werkstattprinzip
- Reduktion des Planungs- und manuellen Steuerungsaufwandes
- Integration in ein echtzeitfähiges Informationsmanagement
- Einbindung, Autonomie und Kooperation der Mitarbeiter
- Stabilisierung der Wertschöpfungskette

4.3.1 Ansatz und Vorgehensweise

Aufbauend auf dem weiter oben definierten Phasenkonzept (vgl. Abbildung 4-2) wird in diesem Unterkapitel die Vorgehensweise beschrieben, mit der das Steuerungsmodell entwickelt und konfiguriert wird. Der Ansatz basiert auf der im Handlungsbedarf (vgl. Kapitel 3.6) bereits genannten Idee einer steuerungsorientierten Modularisierung der Werkstattsteuerung. Dadurch kann anhand von verketteten Modulen über wenige Schnittstellen ein übergeordnetes Steuerungskonzept in einem ganzheitlichen Produktionssystem umgesetzt werden. Diese Betrachtungsweise ermöglicht die Stabilisierung von Steuerungsproblemen und die Verbesserung der logistischen Leistungsfähigkeit insbesondere durch die Kombination zentraler Steuerungsprinzipien und einer modulatorientierten dezentralen Steuerungsautonomie zu untersuchen.

Dazu ist ein integrierter Ansatz notwendig, der durch Zerlegung des komplexen Gesamtproblems in einzelne Funktionsbausteine eine theoretische Lösungsentwicklung ermöglicht und durch einfache intelligente Steuergrößen sowohl eine methodische Vernetzung der Gesamtprozesse als auch klare Entscheidungshilfen für alle beteiligten Mitarbeiter an der Produktionssteuerung bereitstellt. Dabei sind die genannten Funktionsbausteine als Module der Prozesskette („Ebene 1“ nach Abbildung 2-15) zu verstehen. Die dazu entwickelte und in das Phasenkonzept eingeordnete Vorgehensweise wird in Abbildung 4-6 beschrieben.

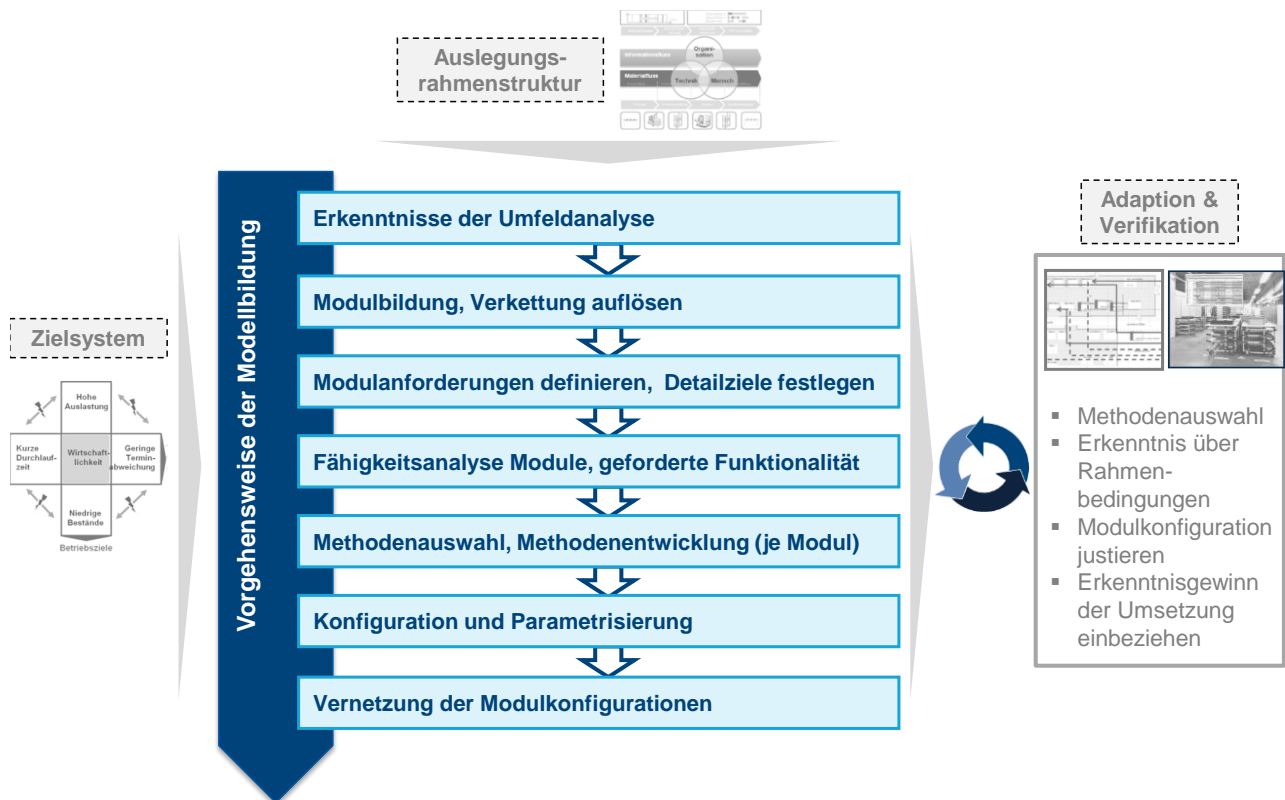


Abbildung 4-6: Vorgehensweise der Modellbildung innerhalb des Phasenkonzeptes

Die Vorgehensweise zeigt, dass sich die Modellbildung auf die vorher definierten Phasen, wie das Zielsystem und die Auslegungsrahmenstruktur, stützt sowie durch etwaige Erkenntnisse aus den Folgephasen, z. B. eine dezentrale Steuergröße aus der Detaillierung des Modells, angepasst werden kann (vgl. Abschnitt 3.3.4).

Durch die nachfolgende Modellbildung mithilfe der beschriebenen Vorgehensweise verändert sich die vollständige Prozesskette von der im Abschnitt 2.2.2 beschriebenen auf **Arbeitsplätzen und Einzelaufträgen** bezogenen Ablaufstruktur in eine **modulorientierte vernetzte Struktur der Produktionssteuerung**. Jedes dieser steuerungsorientierten Module wird dabei für sich betrachtet konfiguriert und parametrisiert. Dabei bestimmt das definierte Zielsystem (vgl. Kapitel 3.1), das Liefertreue und DLZ fokussiert als wesentliche Rahmenbedingung auch die Konfiguration der einzelnen Module.

Schließlich erfolgt die Vernetzung dieser Module mithilfe einer wertstromorientierten Vorgehensweise. Eine auf die einzelnen Module abgestimmte und in der Gesamtkonfiguration ebenso vernetzte Logik mit einem entsprechenden Kennzahlensystem schließt diese Parametrisierung ab. Diesem allgemeinen Ansatz werden die Hypothesen zugrunde gelegt, dass die Veränderung der Struktur in den jeweiligen Modulen folgendes ermöglichen kann:

- Dezentralisierung einzelner Steuerungsaufgaben in der Werkstattfertigung.
- Schaffung einer Fluss- und Pull-Orientierung in der komplexen Ablaufstruktur.
- Funktionsorientierte Konfiguration der einzelnen Steuerungsabschnitte.
- Abgeleitete Stabilisierungsfunktion und Steigerung der Transparenz.
- Engpassarbeitsplätze und Schrittmacherprozesse³² erkennbar.
- Fluss- und Bestandsentkopplung schafft die Möglichkeit zur zielgerichteten Optimierung der Module.

4.3.2 Steuerungsmodell

Die im Vorkapitel vorgestellte Vorgehensweise wird in diesem Abschnitt auf das zugrunde liegende Praxisbeispiel angewandt und detailliert. Die Anwendung dieser Vorgehensweise und des grundlegenden Ansatzes auf die betrachtete reale Ausgangssituation der Produktion wird in Abbildung 4-7 dargestellt. Es werden zunächst die wesentlichen Erkenntnisse aus der Auslegungsrahmenstruktur und der Umfeldanalyse genutzt (**Schritt 1** und **2** in Abbildung 4-7).

Aus den in **Schritt 3** beschriebenen Erkenntnissen der Umfeldanalyse und der bisher durchgeführten theoretischen Betrachtung leitet sich die Idee ab, die hohen Freiheitsgrade der Produktion, die in der Ausgangssituation aufgezeigt wurden, zu eliminieren. Dazu werden Module gebildet, die in der Lage sind teilautonom zu agieren aber dennoch die benötigte hohe Flexibilität für die Umsetzung des Produktionsprogramms ermöglichen. Im finalen **Schritt 4** werden darauffolgend konkrete Lösungsansätze abgeleitet.

Der durch die hier entwickelte Methodik schrittweise erarbeitete Lösungsansatz schlägt vor, vier steuerungsorientierte Module zu bilden. Aufgrund der Tatsache, dass in jedem Modul unterschiedliche strukturelle und technische Voraussetzungen vorliegen (vgl. Kapitel 2), ist dies einerseits eine logische Schlussfolgerung aus dem Gestaltungsfeld der Technik. Andererseits erfordert die Auftragsabwicklung von Einzelaufträgen, schlanke und verschwendungsarme Prozesse mit niedrigen Beständen entlang der vollständigen Auftragsabwicklungskette.

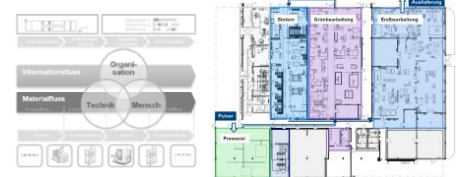
Es reicht daher beispielsweise nicht aus, die Module lediglich zu entkoppeln und mit hohen Zwischenlagern zu nivellieren, da die Wartezeiten und Reihenfolgeveränderungen

³² Wenn alle Produkte eines Produktionsprogramms gleich gesteuert werden, gibt es in jedem Wertstrom genau einen Produktionsprozess, der gesteuert wird, während alle anderen Produktionsprozesse dieses Wertstroms davon abhängig geregelt werden. Dieser Prozess ist der **Schrittmacherprozess**. Dadurch kann auf Basis von Bestands- oder Kundennachfrage eine Art Rhythmus in die Produktion eingesteuert werden [ERL10, S. 233].

zwischen den Modulen dadurch vergleichsweise stark anwachsen können, wodurch keine Reduktion der übergreifenden Steuerungskomplexität erzielt werden kann.

1. Auslegungsrahmenstruktur nach 4.2.3

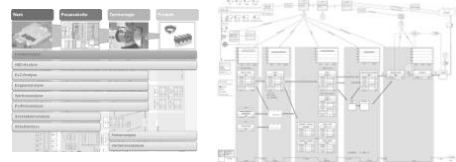
Vgl. Ausgangssituation Kapitel 2



2. Umfeldanalyse nach 4.2.4

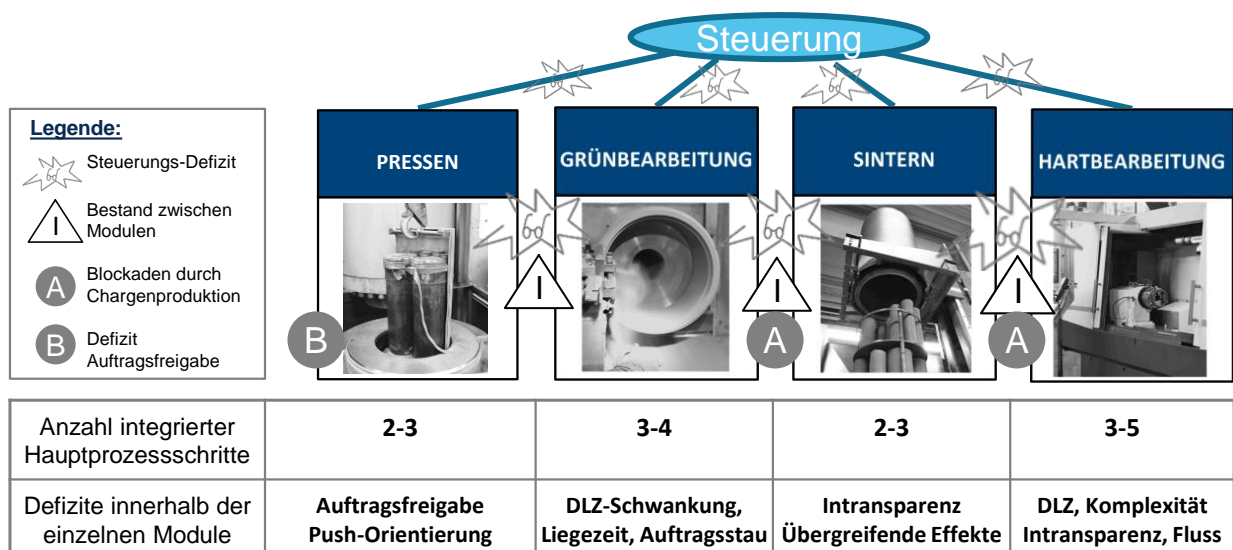
Ergebnisse aus Analysen

(siehe Abbildung 4-5 und Anhang B)



3. Ableitung von Erkenntnissen

Qualitative und quantitative Betrachtung (Wertstrom, Engpässe, Prozesse)



- Verschiedene Potentiale und Gestaltungsansätze je Modul.
- Zwischen den Modulen mangelt es an Transparenz und Steuermöglichkeiten.
- Wechselwirkungen zwischen den Modulen stören den Fluss und synchrone DLZ.
- Innerhalb der Module schwanken die Durchlaufzeiten zusätzlich.
- Ansätze Kapazitäten zu harmonisieren und Taktgeber zu identifizieren fehlen.

4. Lösungsansatz

- Bildung von 4 zusammengefassten „Steuerungsorientierten Modulen“
- Entwicklung von Detail-Steuerungsansätzen für jedes Modul
- Parametrisierung jedes Moduls in der Gesamtkonfiguration
- Vernetzung der Module im wertstromorientierten Produktionssystem

Abbildung 4-7: Strukturiertes Vorgehen zur Formulierung des Lösungsansatzes

Weiterhin wird vorgeschlagen, zunächst die Module zu bilden, diese dann theoretisch zu optimieren, und anschließend anhand der gewonnenen Erkenntnisse wertstromorientiert zu vernetzen. In den einzelnen Modulen müssen dazu die Voraussetzungen entwickelt werden, dass durch hohe Transparenz in Material- und Informationsfluss, geeignete Verfahren zu Kapazitätssteuerung und Reihenfolgenbildung auch dezentral funktionieren. Dazu ist eine Ausrichtung des Material- und Informationsflusses nach dem Pull- und Fließprinzip in diesen Modulen unabdingbar.

Mit diesem Lösungsansatz kann die Einzelauftragssicht der zentralen Produktionssteuerung, die im Ausgangszustand dieser Arbeit bemängelt wurde, trotz einer komplexen Werkstattstruktur gezielt dezentralisiert und die Aufgaben und Prozesse einer zentralen Steuerung neu konfiguriert werden. Erst durch die gezielte Stabilisierung der Prozesskette von einzelnen Modulen ausgehend, lassen sich die übergreifenden Probleme isoliert betrachten und innerhalb des Kontextes des Gesamtmodells lösen.

Visualisierung des Steuerungsmodells

Entsprechend der Priorität des Wertstroms ergeben sich für die jeweiligen Module Anforderungen an deren Wirkmechanismen, die methodisch aufeinander abgestimmt werden müssen. Aus diesen abgeleiteten partiellen Lösungsideen entwickeln sich einzelne modulspezifische Steuerungskonzepte, die nachfolgend in das praktische Umfeld mit geeigneten Maßnahmen, wie z. B. durch Standardisierung von Abläufen und Aufstellen von Regeln für den Materialfluss, implementiert werden. Folglich kommt es bei der Lösungsfindung nicht nur auf theoretische Stimmigkeit im Steuerungsmodell an, sondern auch auf den Aspekt der praktischen Umsetzbarkeit.

Aus der Visualisierung des Steuerungsmodells in Abbildung 4-8 werden die benannten modulspezifischen Lösungsansätze im Rahmen der Grobkonzeption konkretisiert. Die darin beschriebenen Zusammenhänge bauen dabei auf dem von BRACHT, ARZBERGER und SCHULENBURG veröffentlichten Modellansatz (vgl. [BRA15]). auf und wurden weiter detailliert und verbessert.

Das Steuerungsmodell kann die Aufgabenstellung einer vernetzten wertstromorientierten Produktionssteuerung für die variantenreiche Produktion von komplexen Teilen aus Sinterwerkstoffen erklären und lösen. Dieses Modell zeigt zunächst, wie die Prozesskette in Module zerlegt wird und das Zusammenwirken der Teilmodelle in Form der beschriebenen Module mit einem wertstromorientierten Ansatz konzipiert werden kann. Die benannten Module **Presserei**, **Grünbearbeitung**, **Sintern** und **Hartbearbeitung** stellen den Kernbereich der Abbildung 4-8 dar. Weiterhin lassen sich daraus die wesentlichen Schnittstellen zwischen den Modulen und deren abgeleitete Funktionalitäten erkennen, die nachfolgend vertiefend beschrieben werden.

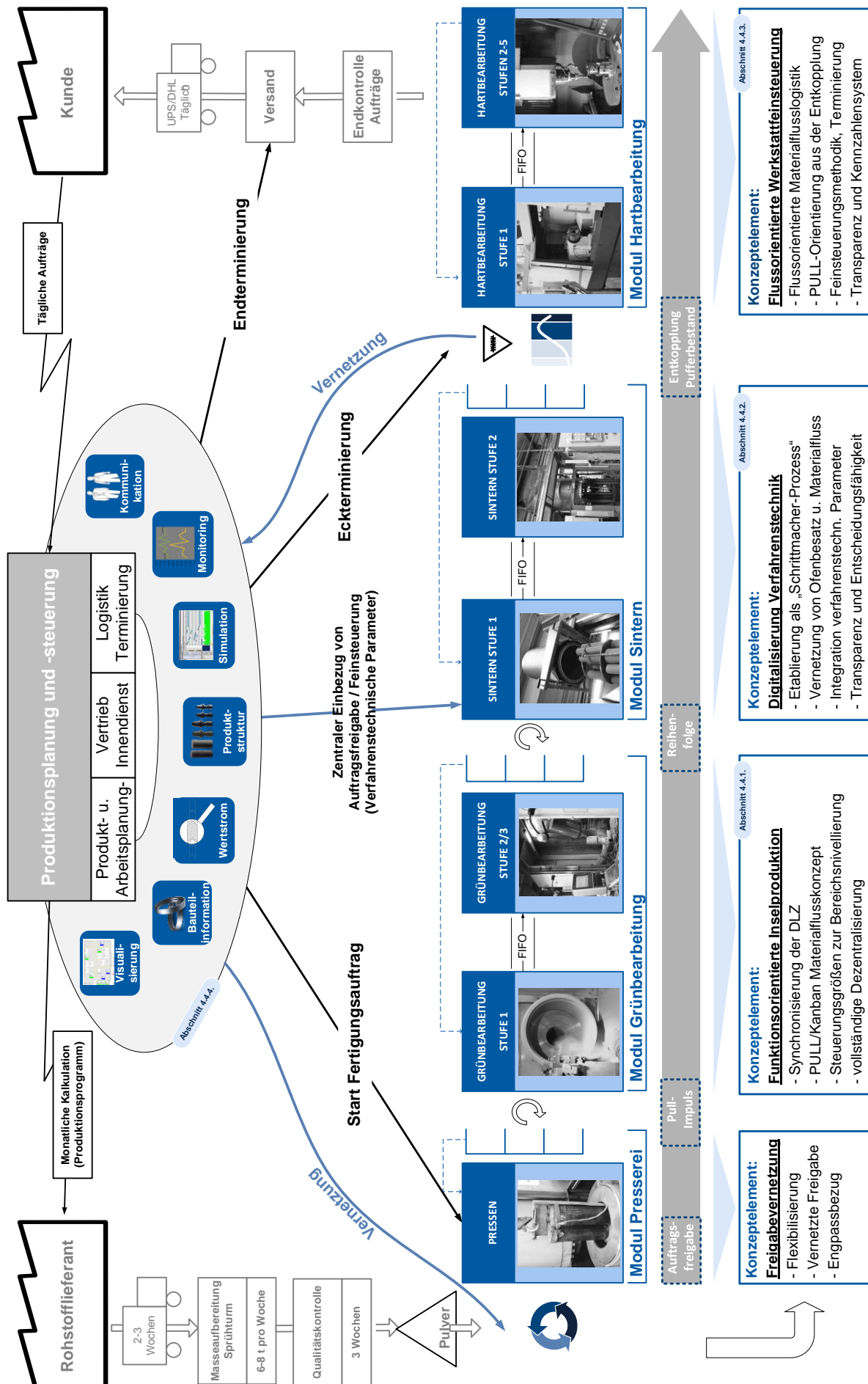


Abbildung 4-8: Steuerungsmodell

Innerhalb der Abbildung 4-8 ist der Kundenkopplungspunkt (vgl. 2.2.2) markiert, der die Endterminierung in diesem Modell bildet, und von dem ausgehend die wertstromorientierte Konfiguration der Module erfolgt. Das Steuerungsmodell nennt hierzu Verbesserungsstrategien für die einzelnen Module und die relevanten Treiber, wie z.B. die dezentrale Synchronisierung im Modul „Grünbearbeitung“, die als Grundannahmen dieser Strategieentwicklung zu verstehen sind.

Die zentrale **Lösungsidee**, die diesem Modell zugrunde liegt, verbindet den Ansatz einer durch **Synchronisierung** erreichten Stabilisierung des Auftragsdurchlaufs und der Durchlaufzeit bis **nach dem Modul Sintern** und eine davon durch einen **Auftragspuffer** entkoppelte und anschließend feingesteuerte Werkstattfertigung im Modul „Hartbearbeitung“. Dieses Grobkonzept kann in einem nächsten Schritt durch Detailmodelle beantwortet werden, die sowohl die erarbeiteten Lösungsansätze vertiefen als auch die Leitfragen in jedem Modul, z.B. durch welche Maßnahmen sich die Verbesserungsstrategien umsetzen lassen, beantworten.

Aus dem Steuerungsmodell (vgl. Abbildung 4-8) kann weiterhin erkannt werden, dass innerhalb dieses Lösungsansatzes nicht nur Module gebildet werden und diese mit standardisierten Verfahren konfiguriert werden. Vielmehr kann hier von jedem Modul eine bestimmte Funktionalität im Produktionssystem ausgehen. Die **Detailmodelle** in den einzelnen Modulen sind demzufolge auch als **Konzeptelemente** (vgl. Tabelle 4-1) zu verstehen, die Funktionalitäten im Gesamtkontext der Konfiguration wahrnehmen. Diese Konzeptelemente werden im Folgeabschnitt vorgestellt und im Kapitel 4.4 vollständig detailliert und beschrieben.

4.3.3 Konzeptelemente

Das Gesamtkonzept besteht somit aus mehreren Konzeptelementen (vgl. Abbildung 4-8), die durch die zentrale Funktion der PPS vernetzt werden. Dabei wird erreicht, dass nunmehr einige Stellen der komplexen verfahrenstechnischen Prozesskette durch übergeordnete Steuerungseingriffe beeinflusst werden. Im Gegensatz zur bisher verwendeten Sichtweise der PPS, finden dabei nicht nur Korrekturen an Einzelaufträgen statt, sondern es werden situationsbasierte Informationen zur Auftragsfreigabe, Reihenfolgenbildung und Kapazitätssteuerung in einer modulspezifischen Sichtweise notwendig.

Von der Auftragsfreigabe vor dem Modul „Pressen“ bis zum Abschluss des Moduls „Sintern“ kann eine Regelstrecke der Produktionssteuerung gebildet werden. Diese Schlussfolgerung ergibt sich aus dem Ansatz zur Synchronisierung des Materialflusses und bereichsweisen Nivellierung der DLZ im Modul „Grünbearbeitung“, mit der die vollständige Regelstrecke stabilisiert werden kann. Aus der Umfeldanalyse ist bekannt, dass hier lange Wartezeiten und Bestände, sich überholende Aufträge und Reihenfolgenvertauschungen die Regel sind, die einen ungerichteten Materialfluss und schwankende Durchlaufzeiten

erzeugen, die wiederum deutliche Auswirkungen in Form von Blockaden und Turbulenzen in den vor- und nachgelagerten Modulen nach sich ziehen (vgl. Abbildung 4-7). Durch einen gerichteten Materialfluss und der Vermeidung von Reihenfolgen- und Prioritätsveränderungen kann vom Modul Grünbearbeitung ausgehend folglich eine Stabilisierung der Regelstrecke beginnen. Die Anbindung des Moduls „Presserei“ erfolgt rückwärts orientiert in der Wertschöpfungskette durch eine bestandsorientierte Steuerung nach dem Pull-Prinzip, wodurch eine hohe Flussorientierung entsteht. In das Modul „Sintern“ ist der kontinuierliche Auftragsfluss aufgrund einer aufwändigen verfahrenstechnischen Chargenproduktion vorwärts in der Wertschöpfungskette nicht fortsetzbar.

Aufgrund der konzipierten Stabilisierung des Wertstroms in den Vormodulen wird das Modul „Sintern“ „isoliert“ betrachtet, da auch im nachfolgenden Modul „Hartbearbeitung“ ein kontinuierlicher Auftragsfluss erreicht werden kann. Diese Betrachtung macht deutlich, dass mehrere Aufträge, unter den Rahmenbedingungen gleicher bzw. ähnlicher verfahrenstechnischer Anforderungen an den Sinterprozess zusammen disponiert werden und mit beispielsweise bis zu 40 Stunden Prozesszeit den längsten Behandlungsprozess durchlaufen. Daraus wird **die Idee für diese Regelstrecke** entwickelt, anhand von verfahrenstechnischen Parametern (vgl. Abschnitt 2.1.2) den Materialfluss und Ofenbesatz im Modul „Sintern“ in der zentralen Steuerung der Auftragsfreigabe zu berücksichtigen und durch Synchronisierung der Durchlaufzeiten in der vorgelagerten Werkstattfertigung die gesamte Prozesskette signifikant zu stabilisieren. Dieser Lösungsansatz etabliert anhand einer Art „Taktorientierung“ das Modul „Sintern“ als Schrittmacherprozess innerhalb der Regelstrecke „Pressen – Sintern“.

Daraus leiten sich die beiden Konzeptelemente ab:

- **Synchronisierung der Durchlaufzeit durch flexible dezentrale Werkstattsteuerung mithilfe der „Funktionsorientierten Insel“**
- **Integration verfahrenstechnischer Parameter in die Produktionssteuerung**

Den zweiten Steuerungsabschnitt stellt maßgeblich das Modul „Hartbearbeitung“ dar. Für dieses Modul wird eine Detailsteuerung entwickelt, um eine transparente wertstromorientierte Materialflusslogistik nach dem Modul „Sintern“ mit geringen Beständen zu ermöglichen. Eine Synchronisierungsstrategie in Bezug auf Durchlaufzeiten und Auftragsfluss wie im Modul „Grünbearbeitung“ ist in diesem Bereich aufgrund zu starker Schwankungen von Bearbeitungsstufen und -zeiten nicht anwendbar.

Daraus leitet sich das Konzeptelement ab:

- **Flussorientierte Werkstattfeinsteuerung nach dem Pull-Prinzip**

Um die beiden Steuerungsabschnitte vernetzen zu können, kommt einem abgestimmten Kommunikations- und Informationsmanagement eine hohe Bedeutung zu. Dies wird durch die zielgerichtete Integration der unterschiedlichen Module in ein IT-System erreicht. Ne-

ben dem genannten Informationsmanagement und der Kommunikation kommt hierzu modulspezifisch der Visualisierung, geeigneter KPI³³-Überwachung, Wertstrom-Transparenz und Simulationsmöglichkeiten eine wichtige Rolle zu. Diese werden in Abbildung 4-8 schematisch als übergeordnete Funktionalitäten dargestellt.

Daraus leitet sich das letzte Konzeptelement ab:

- **Vernetzung und Echtzeit IT-Integration der Module mithilfe abgestimmter MES/ERP-Konfiguration**

Die erarbeiteten Konzeptelemente werden im Rahmen der Detaillierung des Steuerungsmodells im Folgekapitel vertiefend beschrieben.

4.4 Detaillierung des Steuerungsmodells

Nachdem im vorangegangenen Kapitel 4.3 die Grobkonzeption des Steuerungsmodells für die vernetzte, wertstromorientierte Produktionssteuerung vorgenommen wurde, erfolgt hier die Detaillierung der beschriebenen Zusammenhänge. Dabei werden geeignete Prozessstrukturen und Abläufe für im Hinblick auf eine schrittweise Verifikation in der betrieblichen Praxis entwickelt. Die Abbildung 4-9 ordnet ergänzend den Fortschritt der Betrachtung im Phasenkonzept ein.

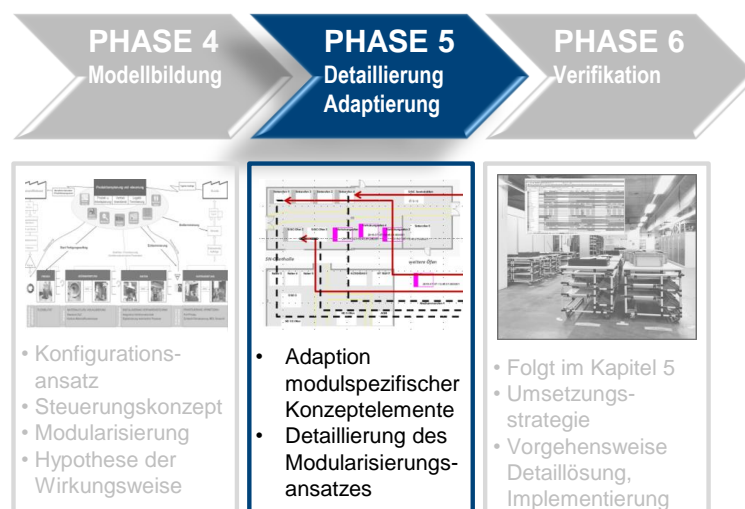


Abbildung 4-9: Phase der Detaillierung und Adaption des Steuerungsmodells

Die „Phase 5“ des Phasenkonzeptes wird hierzu vollständig der Gestaltungsphase in dieser Arbeit (vgl. Abbildung 1-3) zugeordnet. Anhand von Detailkonzepten werden die Konzeptelemente exemplarisch beschrieben und die im Rahmen des Steuerungsmodells identifizierten Verbesserungsstrategien für die Folgephase adaptiert.

³³ Key Performance Indicator (KPI) steht für Leistungskennzahlen, mit denen wichtige Zielsetzungen in einer Organisation gemessen werden.

4.4.1 Konzept der funktionsorientierten Inselproduktion

Die Zielsetzung des Konzeptes leitet sich aus der im Steuerungsmodell (vgl. Abbildung 4-8) geforderten Synchronisierung der Durchlaufzeiten einer Werkstattfertigung ab. Dazu sind die Eigenschaften eines nach dem Pull-Prinzip orientierten Materialflusskonzeptes, einfache lokale Steuerungsgrößen der Kapazitätssteuerung und eine vollständig durch bereichsinterne Steuerung erreichte Nivellierung als vorteilhaft identifiziert worden. Für die klassische Inselfertigung oder Montageinseln sind diese Eigenschaften bekannt, woraus der Begriff der „funktionsorientierten Inselproduktion“ entstanden ist, um eine ursprüngliche funktionsorientierte Produktion mit diesem Prinzipien in Verbindung zu bringen.

Annahme

Auf Grundlage der Umfeldanalyse konnte erkannt werden, dass ungeachtet der hohen Komplexität des Produktionsprogramms Ähnlichkeiten in Form von beispielsweise der Bearbeitungsreihenfolge feststellbar. Obwohl die Bildung von Produktclustern, wie sie meist im Rahmen von Inselfertigungen zur Optimierung verwendet wird, keine Schlussfolgerungen zulassen, sind **verrichtungsorientierte Ähnlichkeiten** im Verfahrensablauf im Modul „Grünbearbeitung“ festzustellen. So liegen beispielsweise die einzelnen Stückzeiten der spanenden Bearbeitung für die meisten Prozessschritte im Bereich von wenigen Minuten (Min). Eine weitere Annahme liegt darin, dass die Größe und Komplexität der Produkte unterschiedliche Fähigkeiten der Maschinen in Bezug auf Bearbeitungsmaße, Werkzeugkonfiguration, oder Spindelanordnung voraussetzt, aber eine generelle Bearbeitungsreihenfolge vereinheitlicht werden kann, bei dem beispielsweise gestuft Maschinenzellen durchlaufen werden. Die Annahme ist, dass niedrige und vergleichbare Bearbeitungszeiten in den Bearbeitungsstufen trotz einer hohen Geometrievielfalt der Produkte bei vergleichbaren Präzisionsanforderungen vorliegen.

Ansatz

Der auf dieser Basis entwickelte Ansatz orientiert sich ebenfalls an dem Gedanken der Modulbildung. Dabei handelt es sich um Module der „Ebene 0“ durch die Arbeitssysteme. Wie in Kapitel 2 beschrieben, lassen sich für diesen Modularisierungsgedanken keine produktbezogenen Prinzipien zur Systemgestaltung anwenden. Daher wird hier der Gedanke einer ressourcenbezogenen Modularisierung weiter geführt (vgl. Abschnitt 3.3.3). Der Ansatz setzt sich dabei zum Ziel, einen zwangsläufig verrichtungsorientierten Produktionsablauf anhand des Flussprinzips im Materialfluss zu optimieren. Das Konzept verwendet die Kopplung der einzelnen Arbeitsstationen nach einem Pull-Prinzip und einfache Steuerungsabläufe, die vergleichbar zu einer produktorientiert segmentierten Fließfertigung sind.

Als Grundlage dafür gilt die bereits diskutierte Organisation der Einzelteil- und Kleinserienfertigung aus Abschnitt 2.1.4, auf die hier verwiesen wird. Der Ansatz der funktionsorien-

tierten Inselfertigung wird hergeleitet, um die **Vorteile der Werkstattfertigung** mit den Vorteilen der **produktorientierten Inselfertigung** zu vereinen.

Konzept

In der funktionsorientierten Inselproduktion werden primär eine hohe Flexibilität in der Anpassung der Werkstücke an die Bearbeitungsfolgen, sowie die Reaktionsschnelligkeit bei schwankenden werkstoffbedingten Anforderungen durch die Sinterbauteile erreicht. Dazu besteht die Notwendigkeit, einerseits technologisches Wissen zu konzentrieren und eine möglichst hohe Elastizität zu ermöglichen. Diese Vorteile sind für die klassische Werkstattfertigung bekannt. Andererseits ermöglicht eine funktionsorientierte Inselproduktion ein möglichst hohes Maß an organisatorischer und planerischer Selbstverantwortung, die Möglichkeit einer transparenten Feinterminierung sowie durchweg einfachere Steuerungsmöglichkeiten. Diese Vorteile sind für die konventionell produktorientierte Inselproduktion und für die feiner auflösende stückweise Fertigung (One-Piece-Flow) bekannt. (vgl. Grundlagen in Tabelle 2-3)

Die Organisationsform der funktionsorientierten Inselproduktion verbindet die genannten Eigenschaften in Form eines „**hybriden Fertigungsprinzips**“. Bei der Gestaltung von Material- und Informationsfluss erfolgt somit die Verbindung der weiter oben genannten Vorteile. Anstatt von **Produktfamilien** werden „**Verfahrensfamilien**“, beispielsweise durch gruppierte Produktionsverfahren und -abläufe, innerhalb von Zellen gebildet, die in Form einer Insel nach dem Verfahrensablauf angeordnet werden. Die Abbildung 4-10 stellt das Konzept der funktionsorientierten Inselproduktion dar.

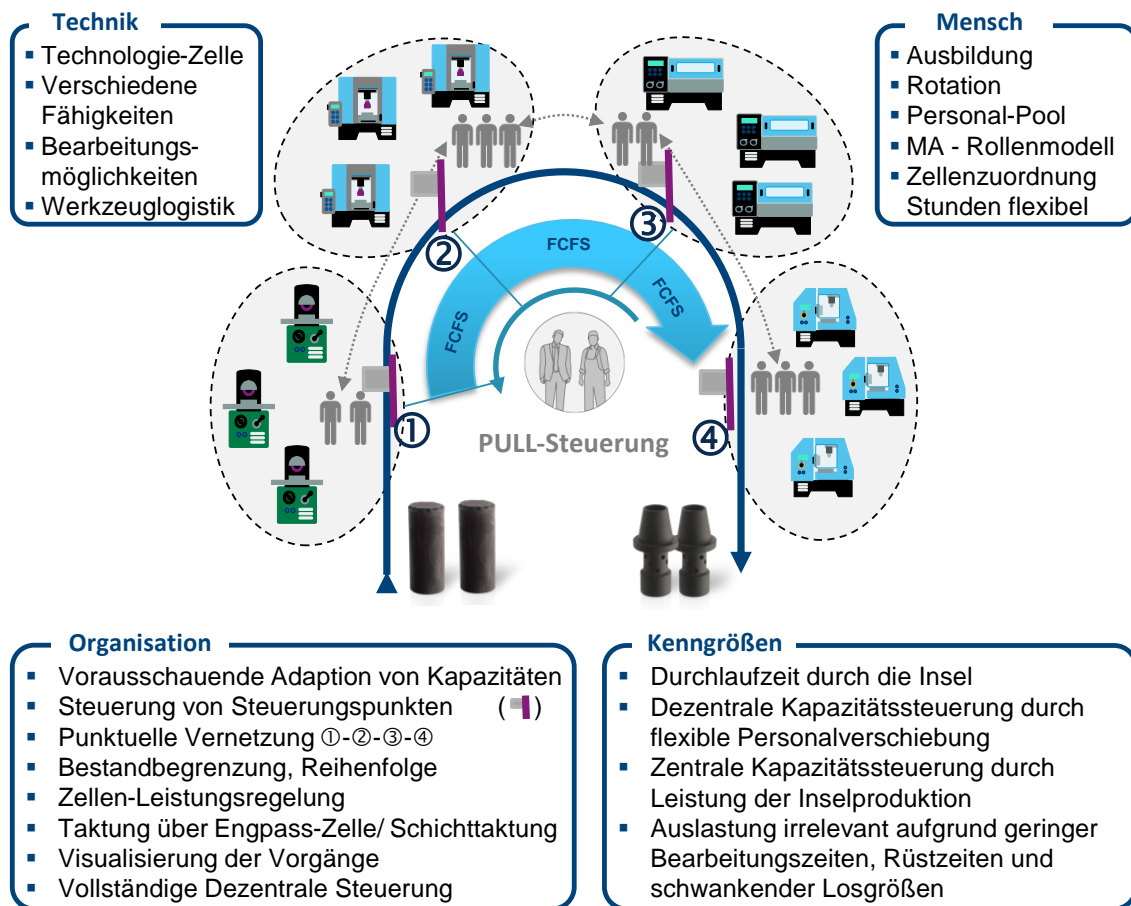


Abbildung 4-10: Konzept der funktionsorientierten Inselproduktion

In dieser Abbildung ist der Wirkungszusammenhang der im U-Layout angeordneten Zellen, der Mitarbeiter und der dezentralisierten Steuerung dargestellt. Die funktionsorientierten Zellen werden über Steuerungspunkte nach dem Pull-Prinzip nivelliert und durch Begrenzung des Umlaufbestandes innerhalb der Inselproduktion vollständig dezentral gesteuert. Aus dem heterogenen Auftragsbestand können Gruppen gebildet werden, die nach *FCFS* (vgl. Tabelle 3-2) in jeder Zelle autonom bearbeitet werden. Dabei erfolgt in Anlehnung an die *Taktororientierte Fertigungssteuerung* (TFS vgl. Tabelle 3-3) die Taktung entweder über die aktuelle Engpasszelle, oder in Form eines Taktes pro Betriebskalender-tag (BKT). Aufgrund des heterogenen Produktprogramms sind flexible Personalverschiebungen und eine flexible Organisation der Betriebsmittel notwendig, um die Leistung in den Zellen variabel anzupassen.

Hohe Bedeutung kommt der Zusammenstellung der **getakteten Auftragspakete** zu, welches eine ausführungsnah Feinsteuerungsaufgabe darstellt. Diese Pakete bestimmen maßgeblich die Kapazitätsauslastung in den einzelnen Fertigungszellen entlang der funktionsorientierten Insel und können voraussichtlich das heterogene Produktionsprogramm im begrenzten Maße ausgleichen. Dadurch können einerseits unterschiedliche Machbarkeitsbereiche von Maschinen berücksichtigt werden und andererseits die Ablauforganisa-

tion in den Zellen optimiert werden. Das bedeutet beispielsweise, dass in einem Auftragspaket kleinere und größere Stückzahlen sowie Einzelteile und unterschiedliche Bauteilgrößen gezielt im Rahmen der vorliegenden Auftragssituation vermisch werden. Daraus entsteht mit steigenden Erfahrungen die Möglichkeit, Muster für die Paketbildung abzuleiten.

Hierzu ist die Visualisierung der Abläufe vor Ort, definierte Regeln für die führende Reihenfolgen-Priorität in den einzelnen Steuerungspunkten wie beispielsweise nach *EDD* (vgl. Tabelle 3-2) und der Erfahrung der steuernden Mitarbeiter in der Inselproduktion entscheidend. Eine Restflexibilität bleibt durch minimale Bestände und Reihenfolgenänderungen in den Steuerungspunkten und die Trägheit im Taktsystem vorhanden, um auch einen spontanen Produktausfall (vgl. 2.1.2) und andere Prozessrisiken zu kompensieren. Aus dem Blickwinkel der übergeordneten Planung und Steuerung befinden sich Aufträge entweder im geregelten Durchlauf der dezentralen Selbststeuerung, oder in Form eines vorgelagerten Pufferbestandes auf definierten Stellplätzen in den Steuerungspunkten. Als übergeordnete Stellgröße für die Inselproduktion gilt die Leistung pro Takt, die im Wesentlichen durch den Personaleinsatz variabel abgebildet wird. Die Abbildung 4-11 stellt die genannten Zusammenhänge der dezentralen Selbststeuerung vereinfacht schematisch dar.

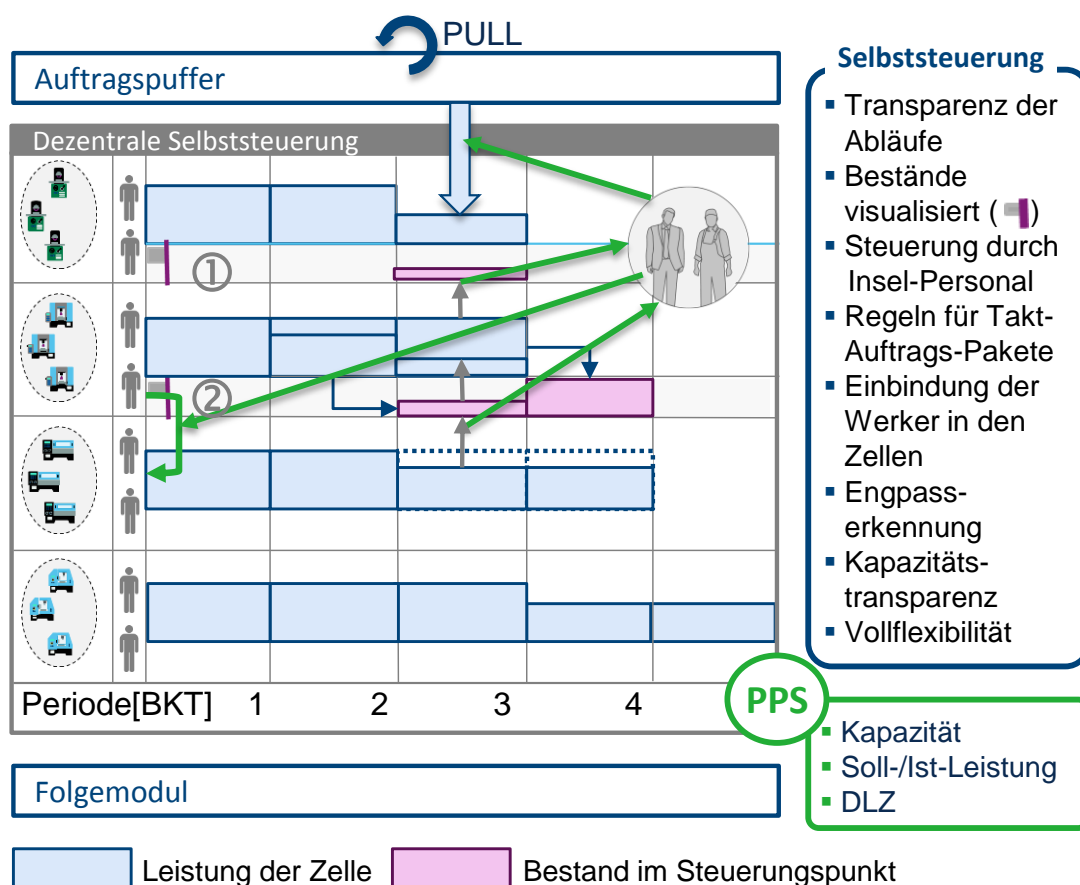


Abbildung 4-11: Schematische Darstellung der dezentralen Feinststeuerung

Das Primärziel des Konzeptelementes, durch Synchronisierung der Durchlaufzeit eine Stabilisierung und Turbulenzminimierung am Anfang der heterogenen Prozesskette (vgl. Abbildung 2-4) zu bewirken, kann durch die funktionsorientierte Insel erreicht werden. Ein weiterer Stabilisierungseffekt entsteht durch die lediglich punktuelle Anbindung an die übergeordneten PPS, dadurch dass keine zentralen Steuerungsimpulse auf Einzelaufträge oder Einzelmaschinen erfolgen, und damit stetig Terminketten verändert werden.

4.4.2 Konzept zur Integration verfahrenstechnischer Parameter

Ein weiteres Konzeptelement im Steuerungsmodell stellt die Integration von verfahrenstechnischen Parametern in die Fertigungssteuerung dar. Dadurch kann eine Erhöhung der technischen Transparenz in einer durch die Verfahrenstechnik bestimmten aufwändigen Chargenfertigung erreicht werden, und diese Informationen gezielt im Produktionssteuersystem verarbeitet werden.

Annahme

Im Rahmen der Konzeption des Steuerungsmodells wurde in Abschnitt 4.3.3 eine hypothetische Betrachtung des Moduls „Sintern“ durchgeführt, die durch eine vollständige Entkopplung dieses Moduls vom jeweils vor- und nachgelagerten Modul einen Ansatz zur Effizienzsteigerung durch die Einführung eines Chargen-Takt-Modells zeigt. Ein derartiges Modell könnte sowohl auslastungs- als auch durchlaufzeitoptimiert (vgl. 3.1.1) konfiguriert werden. Unter der Voraussetzung, dass stets ausreichend Vorprodukte in idealer Zusammensetzung in der Chargenfertigung vorliegen, könnten so mehrere Anlagen taktorientiert betrieben werden, was in der Praxis so nicht umsetzbar erscheint, aber dennoch die Möglichkeit eines Ansatzes bietet. Um dies zu vertiefen werden hier auf der Datenbasis der Umfeldanalyse (vgl. 4.2.4) die typischen zeitlichen Abläufe der Wertschöpfung betrachtet. Dadurch kann der stufenweise geschaffene Mehrwert durch Produktionsleistung um beispielsweise organisatorisch bedingten Verschwendungen, Transport oder Nebenzeiten bereinigt dargestellt werden. Die Abbildung 4-12 konkretisiert das anhand des **zeitlichen Signaldiagramms**³⁴ der einzelnen Wertschöpfungsstufen eines Auftragsbeispiels.

³⁴ Das Signaldiagramm ist beispielsweise für den Entwurf von digitalen Systemen in der Elektrotechnik, insbesondere zur Beschreibung von zeitlich abhängigen Zuständen, bekannt (vgl. [LIE06]). In diesem Abschnitt wird diese Betrachtungsweise auf die verfahrenstechnisch verkettete Werkstattfertigung angewandt, um den **zeitlichen Zustand der Wertschöpfung** mit dem Ziel darzustellen, nachfolgend etwaige Ursachen und Wechselwirkungen zwischen den Zuständen erkennen zu können.

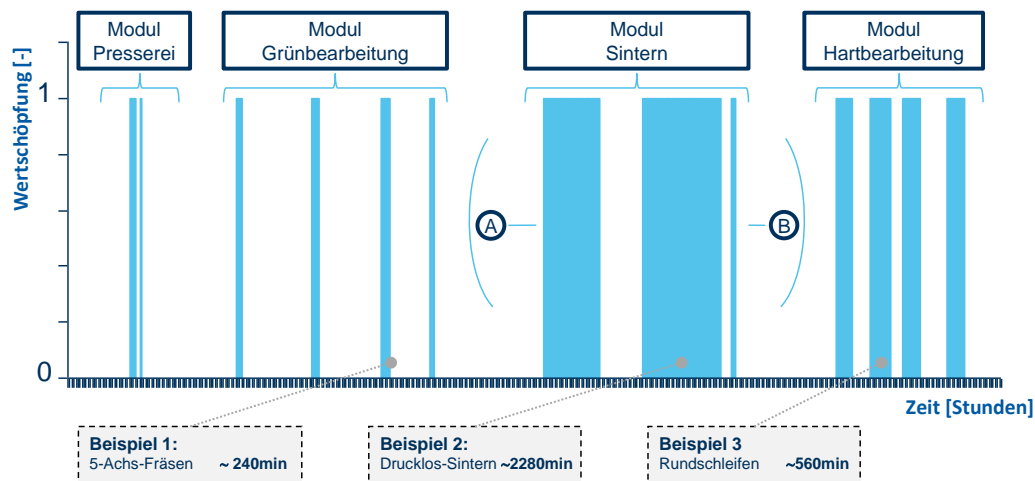


Abbildung 4-12: Signaldiagramm der Wertschöpfung eines repräsentativen Auftrages

In dieser Betrachtung wird der Zustand der Wertschöpfung pro Zeiteinheit durch den Wert 1 im Diagramm gekennzeichnet. Dabei werden die Unterschiede zwischen den Modulen der Werkstattfertigung in Grün- und Hartbearbeitung mit einem Auftragsbezug sowie dem Modul Sintern mit einem Chargenbezug deutlich. Die mehrstufige Chargenproduktion im Modul Sintern zeigt meist lange Behandlungszeiten und eine statische prozesstechnische Engpasssituation, da Wartezeiten und damit Bestände vor und nach dem Modul „Sintern“ entstehen (vgl. Position A und B in Abbildung 4-7). Das liegt einerseits an der Wartezeit vor der Ofenbestückung und andererseits an der hohen Simultanität in der Bereitstellung von mehreren Aufträgen bzw. Teilen nach Abschluss des Prozesses. Verknüpft man das zeitliche Signal mit der dazugehörigen Menge hat diese „Sprungfunktion“ zwischen „A und B“ enorme Bedeutung in der Wertschöpfungskette. Ein Schlüssel zum Erfolg liegt daher in einer erhöhten Anpassungsfähigkeit von Kapazität, Auftragsfluss und -reihenfolge in den vor- und nachgelagerten Modulen und einer hohen Steuerungstransparenz im Modul „Sintern“, um verbesserte logistische Eigenschaften in der gesamten Prozesskette konzipieren zu können.

Ansatz

Ein Lösungsansatz wird darin erkannt, dass durch die Verbindung von verfahrens- mit steuerungsorientierten Kriterien, eine übergeordnete Taktung durch den Einbezug in die Produktionssteuerung und einer Synchronisation ab der Auftragsfreigabe erreicht werden kann. Um diese Kriterien miteinander zu verbinden, wird hier der Begriff des „**Blocks**“ verwendet, der den fertig disponierten **Auftragsbesatz** für einen bestimmten Apparatetyp und einer definierten Prozessführung darstellt. Der **Block** verbindet **Dispositions-Kriterien** und **Verfahrens-Kriterien**. Die Abbildung 4-13 stellt diese Zusammenhänge graphisch dar und zeigt die zu betrachtenden Kriterien auf.

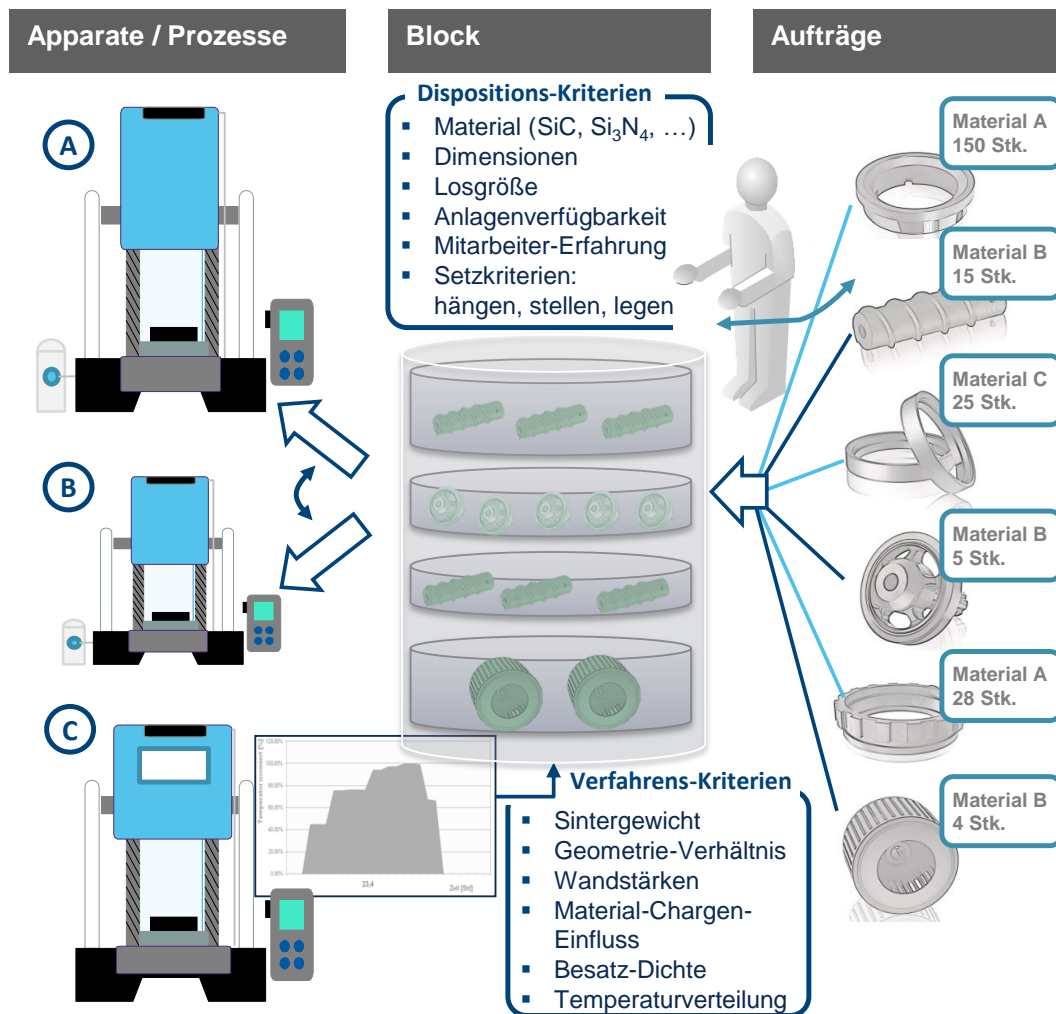


Abbildung 4-13: Verfahrens- und Dispositions-Kriterien der Blockbildung

In den Grundlagen (vgl. 2.1.2 und 2.1.3.) wurden bereits die hohen Abhängigkeiten der Produktions- und Verfahrenstechnik von Produktgeometrie, Materialtyp und der jeweiligen Prozessführung beschrieben. Meist spielt bei der Bestückung der chargenweisen Sinterzyklen sowohl das Expertenwissen der Mitarbeiter als auch das situationsbasierte Vorliegen von Einzelaufträgen und damit von unterschiedlichen Materialien und Geometrien eine entscheidende Rolle. Dieses spezifische Wissen wird i. d. R. nicht in die zentrale Planung einbezogen, da sowohl der Situationsbezug und das Wissen in klassischen PPS-Systemen nicht berücksichtigt werden kann. Im Rahmen dieses Ansatzes gilt es damit insbesondere eine hohe Transparenz der beschriebenen Kriterien in allen Ebenen der Steuerung bereitzustellen, um darauf basierte Verbesserungen durchzuführen.

Konzept

Mit diesem Ansatz lassen sich theoretische Zusammenhänge anhand eines Produkt-Prozess-Clusters ermitteln, z.B. durch die Verbindung von verfahrenstechnisch kritischer Bauteilgeometrie und -gewicht mit einer standardisierten Prozessführung und einer maxi-

mal möglichen Block-Zusammensetzung, um die Ofenbestückung zu steuern. Diese Informationen können im Anschluss mit den Stammdaten des Produktes und des Auftrages verbunden werden. Das Konzept folgt dem Prinzip, Informationen aus dem Wertstrom zu gewinnen und wiederum in eine wertstromorientierte Steuerung der Auftragsfreigabe einfließen zu lassen (vgl. Abschnitt 3.3.2).

In einem ersten Schritt erfolgt die Gewinnung von Informationen aus dem Wertstrom durch die exakte Betrachtung der Vorgänge, der in Abbildung 4-13 dargestellten Blockbildung. Die Blockbildung kann physisch als externer Rüstprozess einer Ofenbestückung mit einem flexiblen Baukastensystem aus Feuerfestmaterialien, wie beispielsweise Grafit verstanden werden. Um die notwendige Verbindung von Verfahrens- und Dispositionskriterien zu erreichen, wird die Methode der **Digitalisierung der Abläufe** in diesem Bereich angewandt. Dazu werden die technischen Prozesse, die Anlagen, die Stammdaten des Produktes und die weiter oben beschriebene Bildung des Blocks in der IT, beispielsweise durch ein **MES-System**, erfasst und **logisch miteinander verbunden**. Es wird dadurch die Digitalisierung der bisher verfahrenstechnisch und physisch geprägten Abläufe erreicht. Das Beispiel in Kapitel 5 vertieft das nachfolgend. Dies ermöglicht neben der Echtzeit-Rückmeldung und des Situationsbezugs innerhalb der Steuerung auch die Visualisierung, sowie Datenauswertung und Clusterbildung zur weiteren Prozessverbesserung. Mit den durch die Digitalisierung gewonnenen Informationen und der dadurch erhöhten Transparenz kann die lokale Feinsteuerung der Ofenkapazitäten und Auftragsreihenfolgen optimiert werden.

Im zweiten Schritt kann die **lokal gewonnene Transparenz** in der zentralen Steuerung dazu verwendet werden, um die verfahrenstechnischen Kriterien im Auftragsfreigabeprozess einfließen zu lassen. Mehrere Aufträge können damit unter den Rahmenbedingungen gleicher bzw. ähnlicher verfahrenstechnischer Anforderungen an den Sinterprozess zusammen disponiert freigegeben und in gleichbleibender Reihenfolge das Modul Sintern erreichen (vgl. Beschreibung der Konzeptelemente in Abschnitt 4.3.3).

Durch das **Produkt-Prozess-Cluster** können anschließend Standardtypen für Blöcke theoretisch festgelegt werden, die z. B. durch Hauptkriterien wie Materials, maximales Gesamtgewichts des Blocks, maximales Einzelteilgewicht, und abgegrenztes Geometrie-Verhältnis (z. B. Außenfläche/Umfang zwischen 0,6 bis 0,8) bestimmt werden. Diese standardisierten Blöcke können einer Prozessführung zugeordnet und mit einer festgelegten Anlagentaktung kapazitätsorientiert verbunden werden. Die Abbildung 4-14 stellt dieses Konzept vereinfacht schematisch dar.

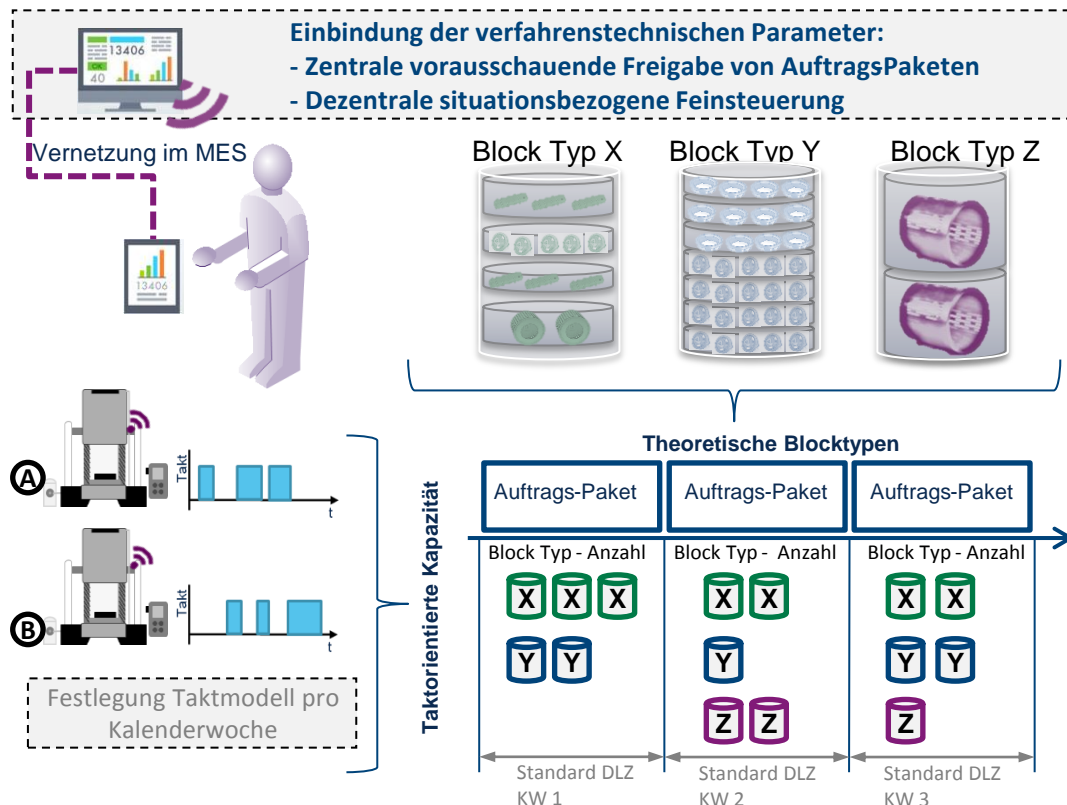


Abbildung 4-14: Vereinfachtes Beispiel zur Bildung von Auftrags-Paketen

Je höher die Beziehungsvielfalt an in Frage kommenden Anlagen und unterschiedlichen Block-Typen wird, desto komplexer wird die Steuerungsaufgabe in der Praxis. Daher wird die Bildung von Auftrags-Paketen auf Basis von standardisierten theoretischen Block-Typen vorgeschlagen. Diesen werden zentral anhand der genannten Hauptkriterien die Aufträge zugeordnet. Verbunden wird das mit den taktorientiert ermittelten Kapazitäten der Sinteranlagen, die aus der praktischen Erfahrung heraus sinnvoll innerhalb einer Kalenderwoche zu definieren sind.

Daraufhin können freizugebende Auftrags-Pakete gebildet werden, die eine taktorientiert bestimmte Kapazität sowie die Verfahrens- und Dispositionskriterien berücksichtigen. Die Abbildung 4-14 zeigt dazu, dass die Zusammensetzung dieser Auftrags-Pakete entsprechend der Vielfalt der Auftragsfertigung im Horizont von zwei bis drei Wochen verändert werden kann, um das kontinuierlich entstehende Produktionsprogramm (vgl. 2.2.1) flexibel berücksichtigen zu können. Durch das Konzept wird im Wesentlichen beabsichtigt, dass die allgemeine Reihenfolge dieser Auftrags-Pakete ab Auftragsfreigabe vorausschauend festgelegt werden kann. Trotzdem kann lokal gegenwartsbezogen aufgrund der vorhandenen Restflexibilität z.B. durch zusätzliche Ofentakte innerhalb einer Kalenderwoche reagiert werden.

Durch die Steuerung der Reihenfolge anhand von Auftrags-Paketen bei der Auftragsfreigabe kann das Modul „Sintern“ in der Regelstrecke „Pressen-Sintern“, die unter 4.3.3 be-

reits beschrieben wurde, als **Schrittmacherprozesses** konzipiert werden. Abgesehen von einem notwendigen Kapazitätsabgleich mit den vorgelagerten Modulen und dem Kundenwunsch können damit auch die verfahrenstechnischen Parameter in die zentrale Produktionssteuerung einbezogen werden. Hier entsteht allerdings eine Schnittstelle zur Produktionsplanung, die innerhalb dieser Arbeit nicht weiter untersucht werden kann.

4.4.3 Konzept der flussorientierten Werkstattfeinsteuerung

Um die Zielsetzung einer wertstromorientierten Produktionssteuerung aus einem Entkopplungspuffer heraus in einer individuellen Auftragsfertigung zu ermöglichen, wird das Konzept der flussorientierten Werkstattfeinsteuerung nach dem Pull-Prinzip entwickelt.

Annahme

Vorhandene Betriebsmittel und Bearbeitungstechnologien müssen aufgrund des beschriebenen Produktionsprogramms (vgl. Abbildung 2-5) und der spezifischen Bearbeitungsabläufe im Modul „Hartbearbeitung“ (vgl. [ARZ14] und Tabelle 2-2) flexibel für verschiedene Produktionsaufträge eingesetzt werden. Die Bearbeitung erfolgt mehrstufig und die Auftragszeit (ZAU) kann von wenigen Minuten bis zu mehreren Tagen pro Fertigungslos betragen. Durch die entsprechenden Auftragswechsel, vielschichtige Anforderungen an Betriebsmittel und die stark unterschiedlichen Bearbeitungsumfänge entsteht ein hoher Anteil unproduktiver Zeiten beispielsweise durch Liege-, Such-, Rüst-, Abklärungs- und weiterer Nebenzeiten. Die Plandaten der Produktionsplanung im ERP-System gelten als unausgereift (vgl. Abschnitt 2.2.1).

Bei der Konzipierung des Steuerungsmodells wurde erkannt, dass sich insbesondere nach dem Modul „Sintern“ im Modul „Hartbearbeitung“ die Steuerungsprobleme (vgl. 2.2.3) der vorgelagerten Prozesskette gegenseitig verstärken. Dies zeigt sich meist in einer Abweichung der Liefertermintreue der vorgelagerten Module und einer hohen Bestandsreichweite (vgl. Abbildung 4-7). Überlegungen, beispielsweise auch in diesem Modul Zusammenhänge zu identifizieren, die eine Nivellierung wie im Modul „Grünbearbeitung“ ermöglichen, konnten dabei keinen Lösungsansatz liefern. Die logistische Leistungsfähigkeit kann hier nur durch Eliminierung der Verschwendungen und durch verbesserte logistische Prozesse, die eine höhere Transparenz in der Ausführungs- und der Lenkungebene ermöglichen, erhöht werden. Um prozessbedingte Schwankungen der Vormodule wirksam steuernd ausgleichen zu können, kommt es auf einen höheren Situationsbezug der Steuerungsentscheidungen an.

Ansatz

Aus dieser Annahme leitet sich der Ansatz ab, die Materialflusskomplexität durch ein **Einzelflussprinzip** zu reduzieren und dadurch höhere Transparenz als Grundlage einer wei-

terführenden Konfiguration der Steuerungsaufgaben zu schaffen. Durch einzeln gesteuerte logistische Einheiten in der Ausführungsebene kann diese Transparenz und Flussorientierung erreicht werden. Damit wird die **Trennung von fließenden und wartenden Fertigungslosen** in einer Werkstattfertigung erzielt und der Auftragsdurchlauf synchronisiert. Der Ansatz setzt sich das Ziel, die hohe Varianz in den Bearbeitungsrouten, dem Produktionsprogramm, der Konstanz der Vorprodukte und der Bearbeitungstechnologie zu beherrschen. Dies wird durch ein verschwendungsarmes, transparentes Feinsteuerungskonzept in Organisations- und Informationsstruktur detailliert zerlegt und damit ganzheitlich konfigurierbar. Dadurch kann zudem die Voraussetzung geschaffen werden, die unzureichende Qualität der Planungsdaten zu verbessern.

Konzept

Die theoretische Lösung der flussorientierten Werkstattfeinsteuerung beruht auf zwei wesentlichen Elementen. Erstens der Schaffung eines transparenten Flussprinzips in der Produktion und zweitens der abgestimmte Aufbau eines durch Sensorik gestützten MES-Systems in Echtzeit zwischen der Feinsteuerung und dem übergeordneten ERP-System. Die Abbildung 4-15 stellt das Konzept der flussorientierten Werkstattfeinsteuerung in einem Überblick dar.

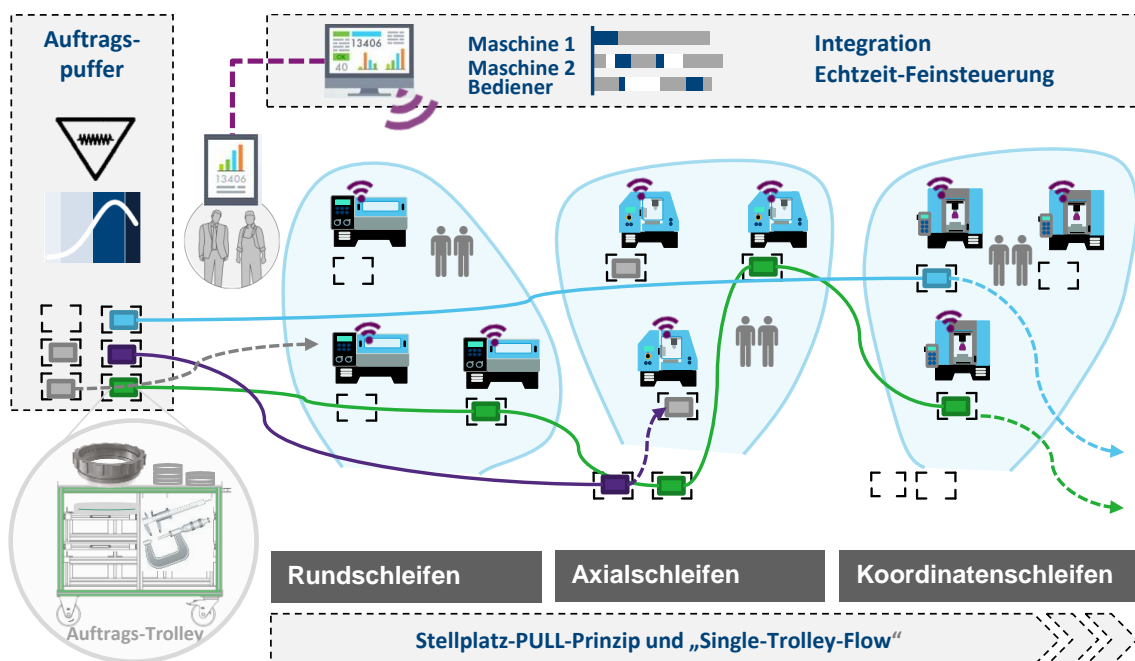


Abbildung 4-15: Konzept der flussorientierten Werkstattfeinsteuerung

Die Materialflusssteuerung in der Ausführungsebene wird dabei durch einen „**Single-Trolley-Flow**“ in ein flussorientiertes Pull-System überführt. Auslöser für die Fließbewegung sind freie Stellplätze an den Maschinen der jeweiligen Bearbeitungszellen der Werkstattfertigung. Zur Flexibilisierung pro Fertigungszelle nutzt man wenige Stellplätze, die

Kollisionen an einzelnen Arbeitssystemen vermeiden und deren Anzahl mit steigender Steuerungserfahrung verändert werden kann. Die Abbildung 4-15 zeigt den Ablauf schematisch anhand von drei Aufträgen. Aus einem Auftragspuffer bewegt sich jeder Auftrag einzeln, unabhängig vom Produkt, oder beispielsweise ob der Auftrag ein komplexes Unikat oder eine einfachere Mittelserie (vgl. Produktionsprogramm in Abbildung 2-5) darstellt. Innerhalb der Werkstattfertigung bewegen sich die Aufträge ausschließlich auf „Single-Trolleys“ bzw. warten darauf an der jeweiligen Bearbeitungsstation. Die Reihenfolgenbildung erfolgt in der Regel bei der ersten Fließbewegung aus dem Auftragspuffer heraus.

Die hier detaillierte Werkstattfeinsteuerung wird durch die Anbindung an ein MES-System in Echtzeit in das PPS-System integriert. Dadurch wird der weiter oben erläuterte transparente Feinsteuerungsansatz in der Ausführungsebene in Bezug auf die Verbindung von Material- und Informationsfluss auch mit der Lenkungebene vernetzt. Aktuelle Auftragsdaten stehen zur Feinsteuerung und Visualisierung zur Verfügung, die die Entscheidungsprozesse in der Produktion beschleunigen und den Abstimmungsaufwand mit der übergeordneten PPS erheblich reduzieren. Mithilfe eines abgestimmten Leitstandkonzeptes wird gleichzeitig die Feinplanung in der Lenkungebene auf Basis dieser kurzfristigen Daten ermöglicht³⁵. Planer und Steurer vor Ort können damit hauptsächlich den Abgang und die Reihenfolgenbildung aus dem Auftragspuffer auf Basis aktueller Informationen des Bestandes und der Reichweite in einem kurzfristigen Zeithorizont festlegen. Die beschriebenen Wirkmechanismen der Gestaltungsfelder Mensch, Organisation und Technik sowie die unterschiedlichen Blickwinkel in der Steuerung sind in Abbildung 4-16 zusammengefasst.

³⁵ Vgl. Aufgabenteilung in der Produktionsplanung und –steuerung in Abschnitt 3.1.2 sowie Integration von IT-Systemen in Abschnitte 3.4.2.

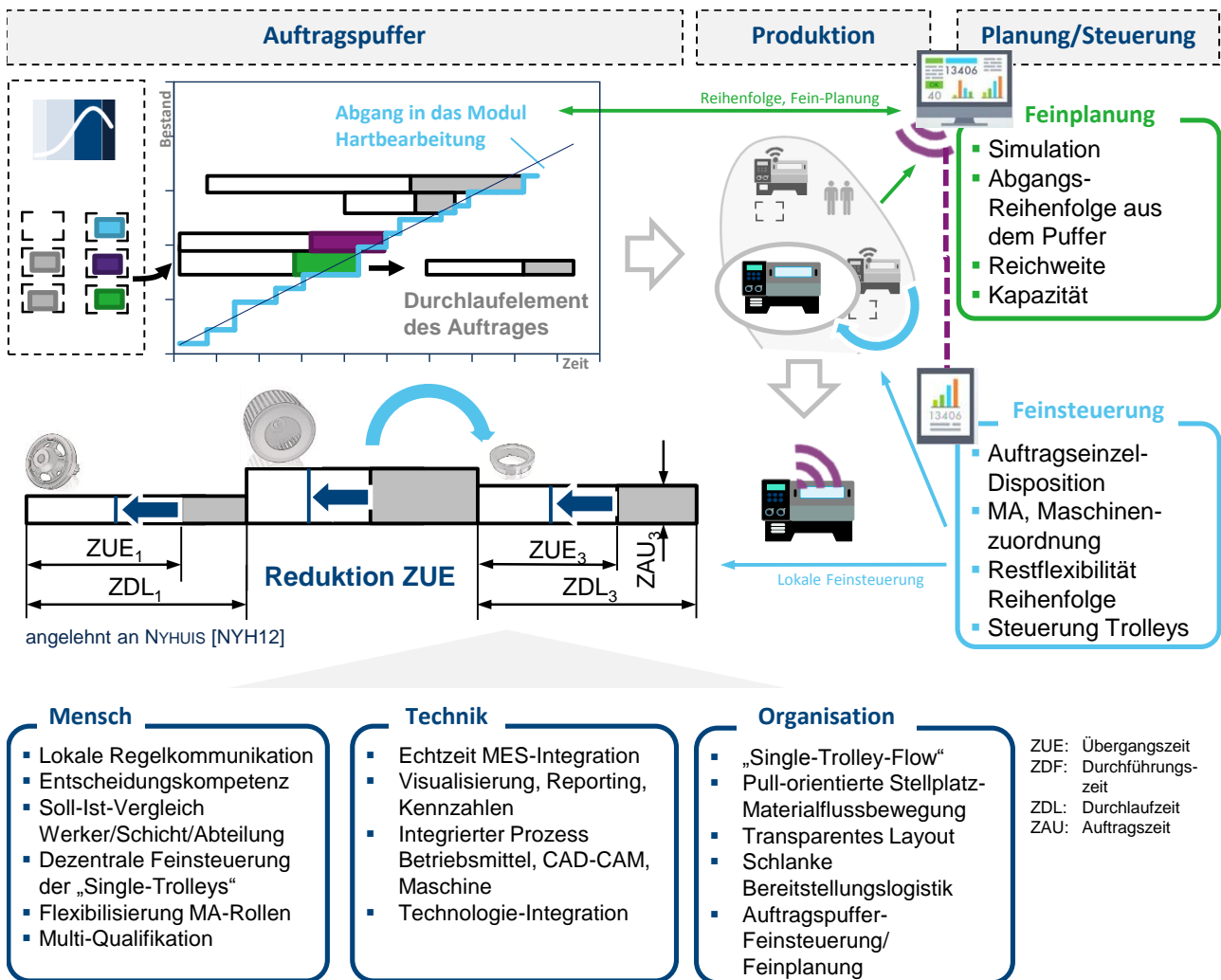


Abbildung 4-16: Wirk- und Steuerungsmechanismen der Gestaltungsfelder

Der Auftragspuffer mit der spezifischen Abgangsfunktion für die verfahrenstechnisch verkettete Werkstattfertigung wird durch das Durchlaufdiagramm³⁶ visualisiert. Im Auftragspuffer innerhalb des Steuerungsmodells sind daher nachfolgende Kenngrößen zur übergeordnete Steuerung von wesentlicher Bedeutung:

Formel 4-1: Mittlerer Bestand im Auftragspuffer³⁷

$$B_m = \frac{FB}{P}$$

mit FB: Fläche zwischen Zugangs- und Abgangskurve in Abbildung 4-16

³⁶ Das Durchlaufdiagramm stellt Zusammenhänge der Kenngrößen Bestand, Durchlaufzeit oder Leistung graphisch dar. Das Arbeitsvolumen wird auf der Ordinate, die Zeit auf der Abszisse aufgetragen. In dieser Arbeit wird dieses Diagramm dazu verwendet, Zugang und Abgang aus dem Auftragspuffer zwischen den Modulen Sintern und Hartbearbeitung zu visualisieren, was in Abschnitt 4.4.5 noch vertiefend gezeigt wird.

³⁷ Formeln 4-1, 4-2 und 4-3 vgl. [NYH12]

Formel 4-2: Mittlere Reichweite im Auftragspuffer

$$R_m = \frac{B_m}{L_m}$$

Formel 4-3: Mittlere Leistung im Abgang durch das Modul Hartbearbeitung

$$L_m = \frac{\sum_{i=1}^n ZAU_i}{P}$$

vgl. Beschreibung der Formelzeichen in Abbildung 4-16

Die genannten strukturellen Maßnahmen von Material- und Informationsfluss wirken dabei im Wesentlichen auf die Verkürzung Übergangszeiten (ZUE) und Verbesserung des Wertstroms in der Ausführungsebene. Die Wirkmechanismen der Feinplanung und -steuerung schaffen die Voraussetzungen, manuelle Eingriffe und die schlechte Rückkopplung zur übergeordneten PPS zu vermeiden.

Im Rahmen einer Umsetzung der flussorientierten Werkstattfeinsteuerung sind weiterführende positive Effekte durch höhere Standardisierung und geringere Verschwendung in den Prozessen zu erwarten. Beispielsweise lassen sich durch besser strukturierte Abläufe im Auftragsfluss auch Betriebsmittel und Werkzeuge besser disponieren, um Rüst- und Vorbereitungszeiten zu senken. Dieses Zusatzpotential reduziert die Auftragszeit (ZAU) und folglich die Durchführungszeit (ZDF) (vgl. Logistische Kennlinien nach NYHUIS [NYH12]) und verbessert damit die logistische Leistungsfähigkeit weiter. Diese Effekte werden hier jedoch theoretisch nicht weiter betrachtet und im Zuge der Bewertung der praktischen Beispiele nochmals aufgegriffen.

4.4.4 Konzept zur IT-Integration und Kommunikation

In der Detaillierung der einzelnen Konzeptelemente innerhalb des Kapitels 4.4 wurde bereits die hohe Bedeutung einer abgestimmten Integration der Elemente in ein IT-System verdeutlicht. Ein Vernetzungsansatz, wie er im Rahmen des Steuerungsmodells entwickelt wurde, ist ohne die Umsetzung in ein angepasstes IT-System nur stark eingeschränkt vorstellbar. Dazu müssen in Bezug auf die Grundfunktionalitäten von PPS-Systemen (vgl. Kapitel 2) vor allem die Schnittstellen zur Datenaufnahme, die Rückmeldelogik von Betriebs- und Maschinendaten sowie die Konfiguration von Sensorik, Datenbank- und Stammdatenstrukturen betrachtet werden, um bestehende IT-Systeme, wie beispielsweise das ERP-System SAP, erweitert zu nutzen.

Die vorher beschriebenen Konzeptelemente machen deutlich, dass jedes Modul eine individuelle Anwendungstiefe erfordert. Dennoch bilden alle Module gemeinsam die Anforderung, durch hochauflösende Produktionsdaten die Stammdatenqualität zu verbessern, sowie die Digitalisierung und Visualisierung zur Steuerung von Abläufen und der Förderung situationsbasierter Entscheidungen zu verwenden. Derartige Anforderungen können heute

nur MES-Systeme erfüllen, die mit einer Echtzeit-Sensorik ausgerüstet aktuelle Maschinen-, Prozess- und Betriebsdaten verarbeiten. Die Abbildung 4-17 verbindet dazu die im Steuerungsmodell geforderten Funktionen, wie beispielweise Visualisierung, Simulation und das Monitoring. Unter Einbezug der im Stand der Technik ermittelten Funktionsgliederung der Kommunikation werden hierzu die Module des Steuerungsmodells entsprechend angebunden.

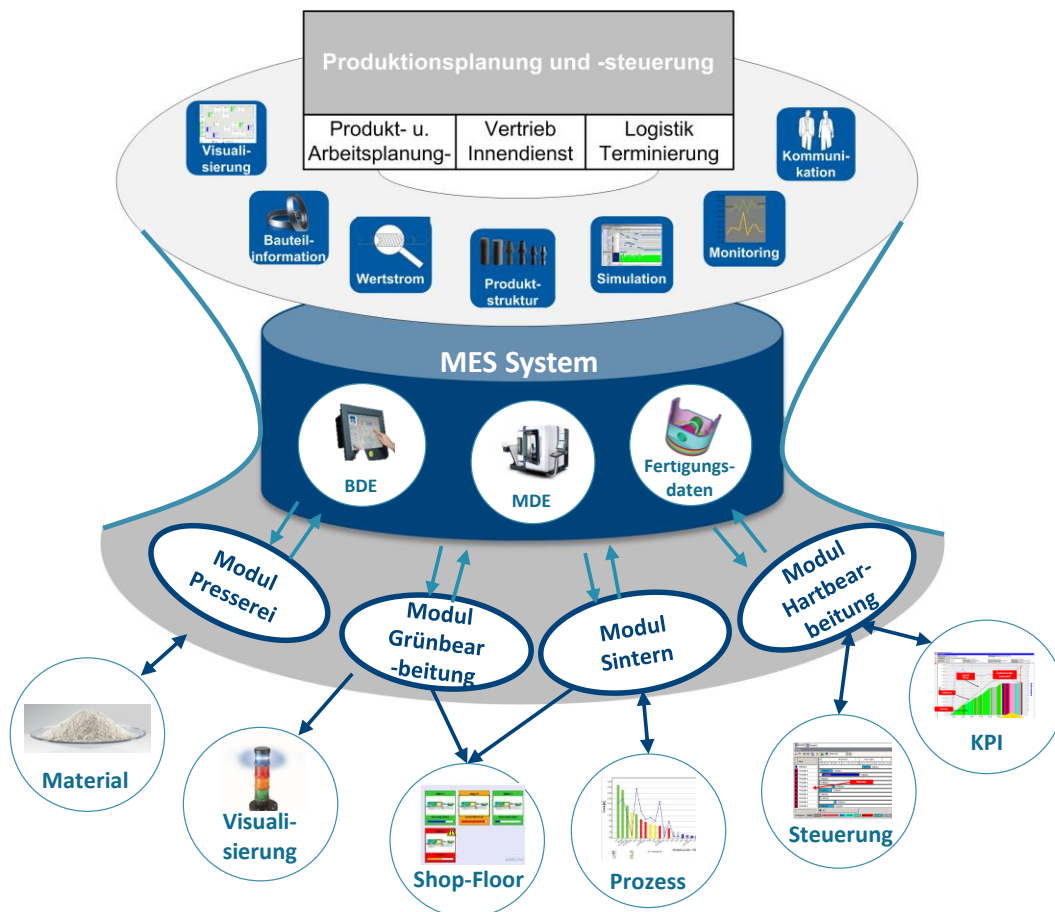


Abbildung 4-17: IT-Anbindung der Module

Innerhalb der Module erzielt man dadurch vermutlich eine Erhöhung von Flexibilität, verbesserte Wertstromorientierung und die Vermeidung von Verschwendung in der Auftragsabwicklung, was im Kapitel 5 anhand von Beispielen vertiefend gezeigt werden kann. Zudem gilt es zielgerichtete Steuerungsaktionen je Modul, wie z. B. Veränderungen der Auftragsreihenfolge in Engpässen, anstatt überwachender Steuerungsreaktionen, wie z. B. Sonderschichten bei terminlich bereits rückständigen Aufträgen, zu etablieren. Die Verfügbarkeit situationsbasierter Informationen, Auftrags- und Maschinendaten und entsprechender Kennzahlen sind in hierzu elementar für die Steigerung der Transparenz in allen Ebenen des Gestaltungsbereichs.

Darüber hinaus gilt die Visualisierung als ein zentrales Element zur Kommunikationsunterstützung, um allen Entscheidungsebenen einen intuitiven Zugang zu diesem Sachverhalt zu ermöglichen und dadurch Kosten- und Zeiteinsparungen zu erreichen [BRA13]. Die

Tabelle 4-2 vertieft die Integration dieser Funktionalitäten in die Module und beschreibt die entwickelte Integrationstiefe im Vergleich mit dem Abschnitt 3.4.2.

Tabelle 4-2: Integrationskonzept der Module in die ERP/MES-Systeme

Modul Konzeptelement	IT-Funktion	Integration (vgl. 3.4.2)	Kennzahlen Kommunikation
Grünbearbeitung FUNKTIONS- ORIENTIERTE INSEL	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Echtzeit-Auftragsfortschritt ▪ Visualisierung ▪ BDE, MDE Auswertelogik ▪ Auftrags-, und Kennzahlen-Cockpit ▪ Fertigungs- und Werkzeugdaten 	PASSIV	Auslastung, OEE DLZ der Insel Plan-Ist-Vergleich
		ERP/MES Variante B (vgl. Abbildung 3-12)	
Sintern DIGITALISIERUNG VERFAHRENS- TECHNIK	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Echtzeit-Auftragsfortschritt ▪ Prozessparameter ▪ Track & Trace Chargenfertigung ▪ Prozesslogistik ▪ Digitalisierung Bestückungsprozess ▪ Produkt/Prozess/Anlagen-Datenintegration ▪ Visualisierung und Auswertung 	PASSIV	Auslastung Prozessstatistik z. B. (Kg/Zyklus) Ausschuss, Nacharbeit, Statistik Ofennutzung, Reihenfolge, Priorisierung
		ERP/MES Variante B (vgl. Abbildung 3-12)	
Hartbearbeitung FLUSSORIENTIERTE WERKSTATTFEIN- STEUERUNG	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Echtzeit-Auftragsfortschritt ▪ Feinsteuerung, Fertigungsleitstand ▪ BDE, MDE Auswertelogik ▪ Visualisierung ▪ Auftrags-, und Kennzahlen-Logik ▪ Fertigungs- und Werkzeugdaten 	AKTIV	Auslastung, OEE DLZ der Insel Plan-Ist-Vergleich Mengenreport Personalzeit, Schicht-Cockpit
		ERP/MES Variante A (vgl. Abbildung 3-12)	

Auf Basis dieser Konzeption wurde in der Umsetzungsphase dieser Arbeit im Rahmen eines Projektes ein bestehendes ERP-System durch ein MES-System ergänzt. Anhand von entsprechenden praktischen Beispielen wird in Kapitel 5 die Wirkungsweise dargestellt.

4.4.5 Vernetzungskonzept

Das Vernetzungskonzept stellt eine Detaillierung des in Abbildung 4-8 vorgestellten Steuerungsmodells dar und erklärt vertiefend das Zusammenwirken der bereits beschriebenen Konzeptelemente. Die Zielsetzung, wenige definierte Eingriffspunkte durch eine übergreifende Steuerung zu berücksichtigen, wird durch die Vernetzung erreicht. Ein wesentlicher Ansatz ist die Unterscheidung zwischen zentralen und dezentralen Steuerungsaufgaben in den einzelnen Modulen.

Steuerungskreislauf in Ausführungs- und Lenkungsebene

Die Zuordnung und Beschreibung der dezentral organisierten Steuerungsaufgaben wurde in den Vorkapiteln anhand der Konzeptelemente bereits detailliert. Dabei nimmt das lokale Führungspersonal die Aufgaben insbesondere der Reihenfolgenbildung und Kapazitätssteuerung in den jeweiligen Modulen wahr. Der Blickwinkel der dezentralen Steuerung ermöglicht in diesem Konzept, dass lokale Steuerungsentscheidungen mit hohem Bezug zur Gegenwart und zur vorliegenden Produktionssituation getroffen werden. So können beispielsweise dynamische Störgrößen und kurzfristige Engpässe, wie z. B. technische Defekte, Werkzeugausfall oder kurzfristig fehlende qualifizierte Mitarbeiter (vgl. Kapitel 2.2), durch die beschriebenen dezentralen Regelkreise der Module gesteuert werden. Diese modulatorientierte Ablaufstruktur der Auftragsfertigung begrenzt zudem Wechselwirkungen zwischen den Modulen.

Zwischen Ausführungs- und Lenkungsebene genügen nunmehr wenige Schnittstellen zur Vernetzung. Beispielsweise berücksichtigt das Modell im Modul „Grünbearbeitung“, die Modul-DLZ und die verfügbare Kapazität, ohne auf detaillierte Abläufe zu achten. Die zentrale Steuerung nutzt dazu die Regelgrößen aus den Modulen „Sintern“ und „Grünbearbeitung“ und den Entkopplungsbestand. Darauf basierend erfolgt die Auftragsfreigabe und Reihenfolgenbildung von Auftrags-Paketen, die in synchronisierter Durchlaufzeit den Entkopplungspuffer vor dem Modul „Hartbearbeitung“ erreichen.

Die Abbildung 4-18 fasst diese Wirkungsmechanismen in und zwischen den Modulen in Form eines **vernetzten Steuerungskreislaufes** zusammen. Im unteren Teil der Abbildung sind in der Ausführungsebene die Module Presserei, Grünbearbeitung, Sintern und Hartbearbeitung ersichtlich. Die Pfeile stellen die Führungs-, Stell- und Regelgrößen des Steuerungskreislaufes dar. Weiterhin ist aus der Abbildung die Schnittstelle zur Produktionsplanung zu erkennen, in der beispielsweise die Kapazitäten zentral und mittelfristig zukunftsorientiert geplant werden.

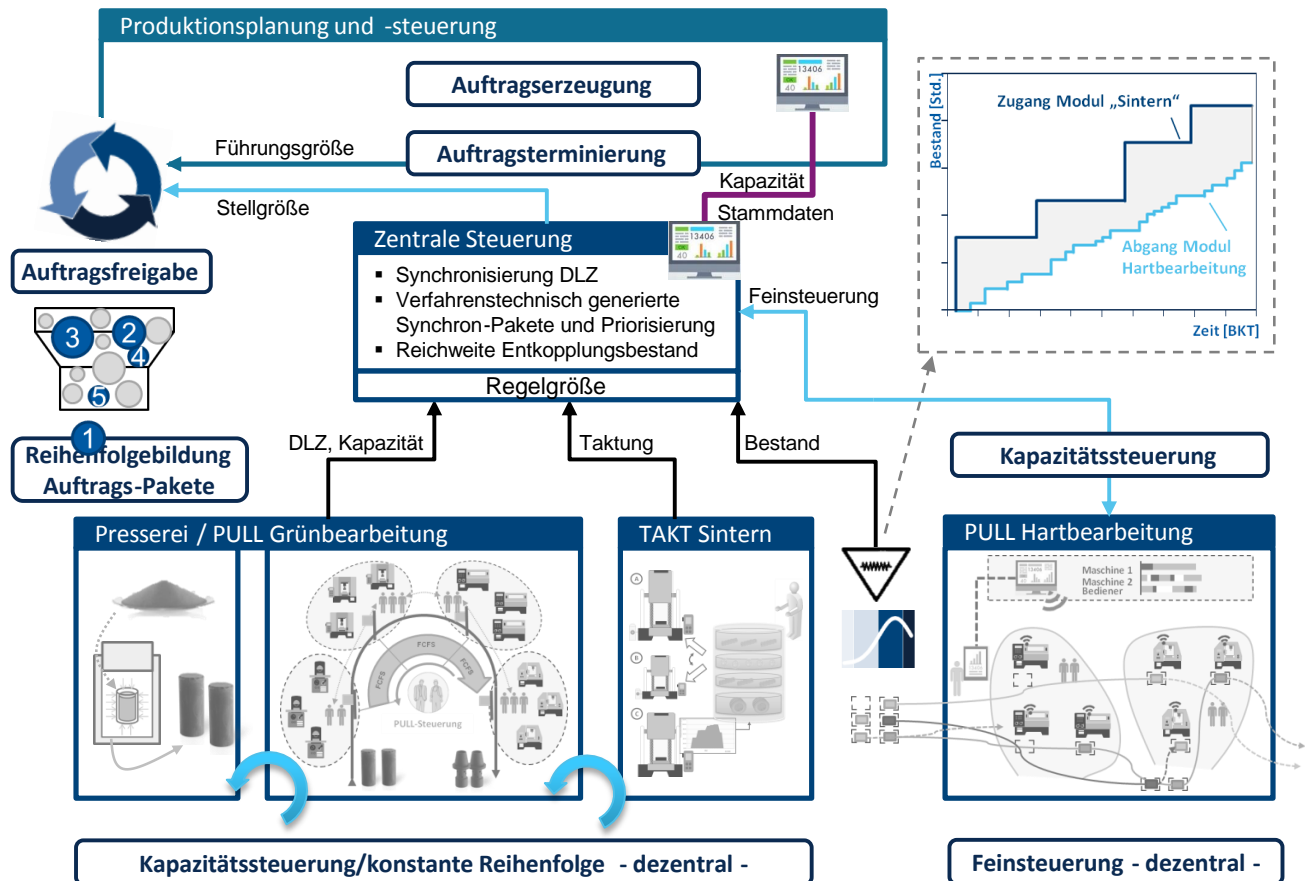


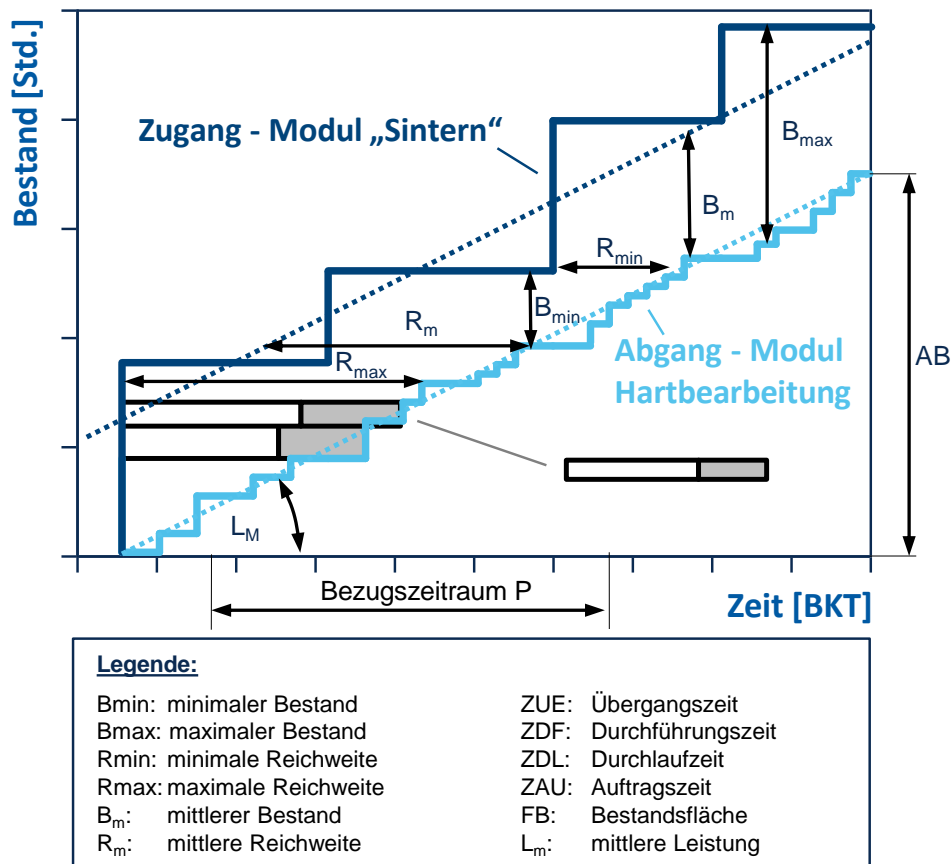
Abbildung 4-18: Detaillierung des Vernetzungskonzeptes

Eingriffspunkte

Die zentrale Steuerung fasst die Regelgrößen aus den einzelnen Eingriffspunkten zusammen und bildet die benannte Schnittstelle zur Produktionsplanung im Bereich der Auftragsfreigabe, wo die Führungsgröße der Auftragsterminierung mit der resultierenden Stellgröße zur Bildung von Auftragspaketen und Reihenfolgenbildung abgeglichen und priorisiert wird. Die zentrale Steuerung koordiniert vorausschauend die Module. Beispielsweise kann hierzu bei abweichender Leistung oder bei auftretenden Problemen in Bezug auf die Durchlaufzeit im Modul Grünbearbeitung zentral in die Auftragsfreigabe eingegriffen werden. Die zentralen Regelgrößen aus den Modulen Grünbearbeitung und Sintern steuern letztendlich über die Auftragsfreigabe und dezentral koordinierte Bestände innerhalb dieser Module die zeitliche Entwicklung des Auftragsbestandes im Auftragspuffer, was in Abbildung 4-18 schematisch dargestellt ist.

Aus dem Durchlaufdiagramm in diesem „Puffer“ sind pulsierende Bestandsschwankungen im Zugang aus dem Modul Sintern zu entnehmen, die aufgrund der Chargenfertigung und einer getakteten Auftragsfreigabe entstehen. Dieser Effekt wurde bereits anhand des Signaldiagramms (vgl. Abbildung 4-12) beschrieben und führt innerhalb des Betrachtungszeitraumes zu einer geringen Anzahl an Bestandsänderungen im Zugang, die aber eine hohe

Änderung der Bestandshöhe auslösen. Der Abgang in das Modul Hartbearbeitung ist in Abbildung 4-19 dem vertiefend gegenübergestellt.



**Abbildung 4-19: Durchlaufdiagramm im Auftragspuffer „Sintern-Hartbearbeitung“
(in Anlehnung an [NYH12])**

Die Abbildung 4-19 erklärt, dass sich die Bestände und Reichweiten der Aufträge im Auftragspuffer aufgrund des Produktionssystems der vernetzten wertstromorientierten Werkstattfertigung pulsierend zwischen minimalen und maximalen Werten verändern. Der Auftragspuffer mit den beschriebenen Kenngrößen des Durchlaufdiagramms stellt daher einen wesentlichen Eingriffspunkt dar. Die Vernetzung des Moduls „Hartbearbeitung“ mit der zentralen Steuerung begünstigt darauffolgend sowohl eine zentral kurzfristig vorausschauende Feinplanung als auch eine lokal situationsbezogene Feinsteuerung. Hierzu wird die durchgängige IT-Vernetzung der Prozesse unter Einbindung der Mitarbeiter angewandt, wie in Abbildung 4-16 bereits beschrieben.

Auf statische Veränderungen des Produktionsprogramms oder der Kapazitätsverfügbarkeit kann dahingegen durch die zentral koordinierende Steuerung reagiert werden. Im Bereich der Auftragsterminierung und -freigabe ist diese mit der Produktionsplanung im ERP-System verbunden. Die Möglichkeit, nur wenige Stellen gezielt vorausschauend zu steuern, führt z. B. zu einer beträchtlichen Verbesserung der Transparenz für die zentralen

Fertigungssteuerer, trotz eines sehr eingeschränkten Prognosehorizontes in der Auftragsfertigung. Aus der Modelltheorie zeigt sich dadurch bereits das Potential, durch Steigerung der Steuerungstransparenz, die Planungsprozesse zu optimieren. Neben der Qualität der Prognosen kann durch kurze Durchlaufzeiten auch der Planungshorizont und die zeitlichen Phasen der Planung und Steuerung (vgl. Abbildung 3-4) besser ausgenutzt und angepasst werden.

4.5 Zwischenfazit: Vernetzte, wertstromorientierte Produktionssteuerung

Im Kapitel 4 konnte die betrachtete Forschungsfragestellung mit einer vernetzten, wertstromorientierten Produktionssteuerung für die Auftragsfertigung von komplexen Teilen aus Sinterwerkstoffen in Form der Modellierung eines Idealkonzeptes beantwortet werden. Dabei wird anhand eines prozessorientierten Modularisierungsansatzes die Überführung zu einer modulatorientierten vernetzten Ablaufstruktur erreicht. Auf dieser Basis kann ein durch die Chargenfertigung „Sintern“ synchronisierter Steuerungsabschnitt konzipiert werden, der über einen Pufferbestand von wenigen Tagen Reichweite die finale „Hartbearbeitung“ der Aufträge entkoppelt. Diese qualitativen Veränderungen hin zu einer übergeordneten nach „Pull“ orientierten Prozesskette sind in Abbildung 4-20 dargestellt. Der Input des Wertstroms wird hier neben dem Kunden auch durch die zentrale Schnittstellensteuerung beeinflusst.

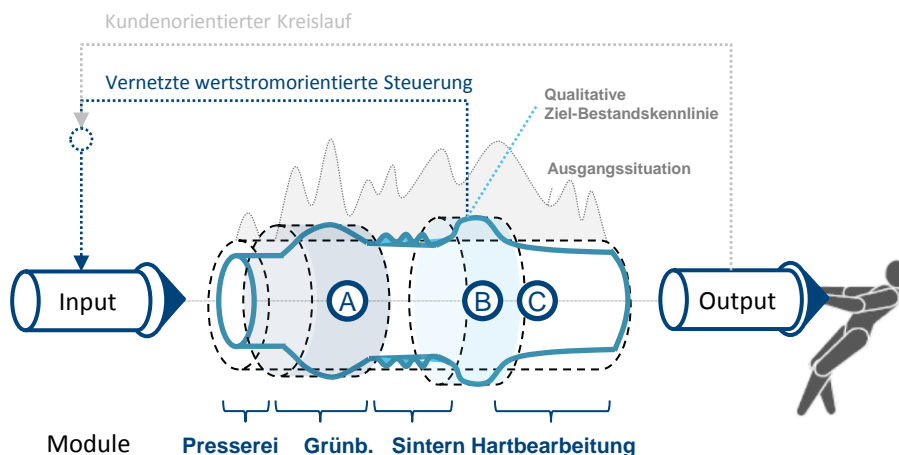


Abbildung 4-20: Qualitative Auswirkungen des Steuerungsmodells (vgl. 3.2.1)

Im Modul „Grünbearbeitung“ wird dezentral eine hohe Steuerungsflexibilität zugelassen und dennoch die Dispositionsfreiheitsgrade im Shop-Floor durch die Organisationsstruktur begrenzt. Der Umlaufbestand im Modul steigt daher nur begrenzt an (Bereich A). Im Modul „Sintern“ entstehen pulsierende Bestandsschwankungen aufgrund der Chargenproduktion.

Das Konzept einer flussorientierten Werkstattfeinsteuerung ermöglicht die Aufträge mit einem hohen Flussgrad³⁸ abzuarbeiten. Unter Einbezug der Feinplanung und hoher Steuerungstransparenz kann das Modul „Hartbearbeitung“ aus einem Entkopplungspuffer, dessen Bestand eine zentrale Steuergröße darstellt (Bereich B), in kurzen Durchlaufzeiten und klarer Trennung vom diesem Entkopplungsbestand durchlaufen werden (Bereich C). Geschwindigkeit und Termineinhaltung können in vielen Fällen durch das Pull-Prinzip erhöht werden, was es in den Folgekapitel noch zu zeigen gilt.

Aus dem konzipierten Zielzustand der Bestandskennlinie im Vergleich zur Ausgangssituation wird die Relevanz der Module „Grünbearbeitung“ und „Hartbearbeitung“ deutlich, um eine Taktorientierung durch die Chargenproduktion „Sintern“ zu etablieren. Daraus leitet sich das hohe Potential ab, in Anlehnung an das Zielsystem (vgl. Abbildung 3-2), Bestände und Durchlaufzeiten in allen Modulen zu senken und durch ausreichende lokale Flexibilität und begrenzte Pufferbestände eine dennoch optimale Produktionsleistung erreichen zu können.

Die wesentlichen Lösungsprinzipien der Modelltheorie sind:

- Vollständige verrichtungsorientierte Flexibilität, die dezentral mit hohem Erfahrungsgrad der operativen Mitarbeiter und transparenteren Systemen verbessert gesteuert wird.
- Deutliche Reduktion der hohen Dispositionsfreiheitsgrade der klassischen Werkstattfertigung durch strukturelle Einschränkungen im Shop-Floor.
- Zentrale und vernetzte Steuerung des Wertstroms auf Basis übergeordneter Transparenz.
- Verbindung des Auftragsfreigabeprozesses mit der zentralen Steuerung unter Beachtung einer taktorientierten verfahrenstechnischen Chargenproduktion.
- Kurzfristige Kapazitätssteuerung und -flexibilität in den Modulen und vorausschauende zentrale Kapazitätssteuerung zwischen den Modulen.

Dabei werden **Materialflüsse** und **Arbeitsabläufe** in jedem Modul unter Berücksichtigung der technologischen Anforderungen strukturiert und im Shop-Floor weitgehend fixiert. Durch die **zusammenfassende Digitalisierung** in durchgängigen und einheitlichen **IT-Prozessen** und hochauflösender Datentransparenz entsteht eine vernetzte Fertigungssteuerung über mehrere Ebenen dieser komplexen Produktion. Entsprechend der funktionalen Ausrichtung der Module kommen unterschiedliche Rollenmodelle zur **Integration der Mitarbeiter** zum Einsatz. Die exakten Erkenntnisse und Erfahrungen über die Funktionalität und etwaige Schwachstellen dieses Idealkonzeptes können dabei nur durch Implementierung gewonnen werden.

³⁸ Der Flussgrad ist definiert als das Verhältnis der Durchlaufzeit (ZDU) zur Durchführungszeit (ZDF). [NYH12] (vgl. Formel 6-3)

5 Anwendung des Modells und Umsetzung idealer Prozessstrukturen

In der Fortsetzung des in Kapitel 4 beschriebenen Vorgehensmodells folgt im vorliegenden Kapitel 5 die Überprüfung des Steuerungsmodells. Dies bezeichnet den letzten Schritt im Forschungsprozess dieser Arbeit (vgl. „Phase 6“ in Abbildung 4-2), und verbindet die theoretische Modellentwicklung mit der praktischen betrieblichen Anwendung anhand konkreter Praxisbeispiele. Das vorliegende Kapitel stellt in der Gestaltungsphase die Überführung in ein Realsystem dar (vgl. Abbildung 5-1). Der entwickelte Modellansatz wird unter Einbeziehung spezifischer Konzeptelemente innerhalb von Fallbeispielen angewendet und kann anschließend empirisch-induktiv bewertet und interpretiert werden.

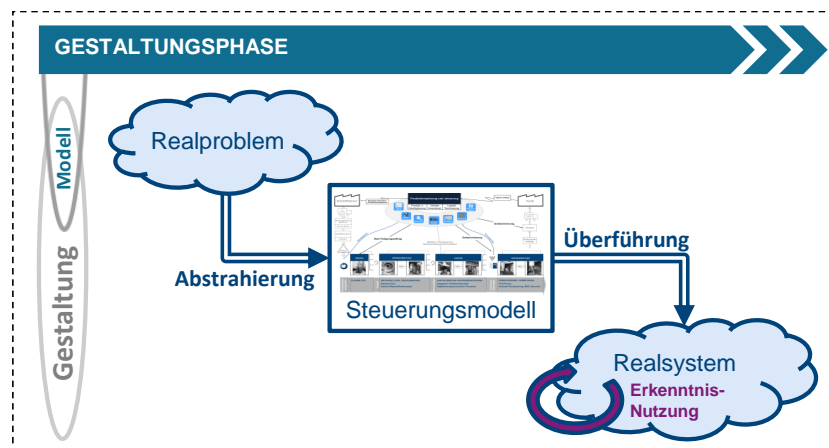


Abbildung 5-1: Anwendung des Steuerungsmodells in der Gestaltungsphase

Durch die dabei erreichte Teilüberführung in die reale Praxisanwendung können die dem Steuerungsmodell zugrunde gelegten Hypothesen in der Realität nachvollzogen werden und spezifische Erfahrungen der Umsetzung aufgezeigt werden.

5.1 Vorgehensweise der Umsetzung

Das Steuerungsmodell der vernetzten, wertstromorientierten Produktionssteuerung beinhaltet das Konzept, auf dessen Basis hier geeignete Umsetzungsmaßnahmen entwickelt werden. Hierzu betrachtet die Gestaltungsphase einerseits den Überführungsprozess und andererseits die Verifikation der Konzeption. Aus der Zusammenfassung der Modellentwicklung in Kapitel 4.5 wird die hohe Bedeutung der Funktionalität der Module „Grünbearbeitung“ und „Hartbearbeitung“ deutlich. Um die gewonnenen Erkenntnisse der Modellentwicklung in einem Realsystem auch durch Nutzung überprüfen zu können, obliegt die

höchste Umsetzungspriorität in den genannten Modulen, um letztendlich Auswirkungen auf das Modul „Sintern“ und die übergreifende Vernetzung identifizieren zu können.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher die Umsetzungspriorität wie folgt festgelegt:

- Flussorientierte Werkstattfeinsteuerung im Modul „Hartbearbeitung“
- Integration der IT und Kommunikationsstruktur
- Verrichtungsorientierte Inselproduktion im Modul Grünbearbeitung
- Digitalisierung der Verfahrenstechnik im Modul Sintern
- Pull-Anbindung des Moduls Presserei
- Etablierung der getakteten Auftragsfreigabe vom Modul „Presserei“ bis zum Modul „Sintern“ und Synchronisation der Durchlaufzeit.

Darauf aufbauend erfolgt in den Folgekapiteln die Vorstellung der erarbeiteten Umsetzungsbeispiele in die betriebliche Praxis. Das Steuerungsmodell stellt eine vereinfachte Abstraktion des Realsystems dar, bei dem nicht alle Aspekte berücksichtigt werden können. Dahingehend wurden folgende Annahmen getroffen:

- Zeitgleich kann nur ein Auftrag im Arbeitssystem bearbeitet werden.
- Die Prozessschritte eines Auftrags sind vorgegeben und der Folgeschritt kann erst begonnen werden, wenn der vorhergehende Schritt abgeschlossen ist.
- Mitarbeiterflexibilisierung und Mehrmaschinenbedienung ist möglich und wird dezentral gesteuert.
- Dynamische Störgrößen wie Ausfälle, Störungen werden primär dezentral gesteuert. Bei übergreifenden Effekten werden sie in der zentralen Steuerung berücksichtigt.
- Kurzfristige Änderungen der Priorisierung, z. B. durch Eilaufträge erfolgt ausschließlich in den Entkopplungsbeständen („Bahnhöfe“). Begonnene Aufträge werden nicht abgebrochen.
- Die Bearbeitungs- und Rüstzeiten gelten als Anhaltspunkt in der Auftragsfertigung und müssen systematisch verbessert werden.
- Vor den Arbeitssystemen dürfen nur definierte Pufferbestände durch gekennzeichnete Stellplätze und im Produktionssystem festgelegte Auftragspuffer entstehen.
- Kurzfristige Kapazitätsbedarfsschwankungen in den Modulen „Grün- und Hartbearbeitung“ sind primär durch Personalverschiebungen ausgleichbar.

Im Vorfeld der praxisnahen Anwendung gilt es sowohl systemische Voraussetzungen zu schaffen als auch Steuerungsgrößen und -richtlinien zu erarbeiten. Diese müssen auf die erarbeiteten Prozesse zugeschnitten und für die beteiligten Mitarbeiter nachvollziehbar sein. Die Digitalisierung von Prozessen und die Schaffung von Transparenz in allen Ebenen der Wertschöpfung kann durch Maßnahmen aus diesen Beispielen erreicht werden (vgl. [BRA15]).

5.2 Beispiel zur flussorientierten Werkstattfeinsteuerung

5.2.1 Prozessstrukturen in der Organisation

Im Rahmen der Umsetzungsphase wird auf das Modul „Hartbearbeitung“ das Steuerungsmodell angewandt und dabei die Konzeptelemente der „flussorientierten Werkstattfeinsteuerung“ und der „IT Integration“ vollständig in die betriebliche Praxis **implementiert**. Dazu wurden aus den in Kapitel 4 beschriebenen theoretischen Erkenntnissen Projekte abgeleitet, die konzeptionell im Rahmen dieser Arbeit geplant und gesteuert wurden. Die entsprechende Umsetzung erfolgte dabei innerhalb eines Projektteams des betrachteten Betriebes mit Unterstützung von Fachabteilungen, z.B. im Bereich IT und Infrastruktur, unter fachlicher Leitung des Verfassers dieser Arbeit.

Aus dem Konzept leiten sich Umsetzungsmaßnahmen ab, die geplant, getestet und in die Industrieanwendung überführt wurden. Aus dem in Unterkapitel 4.4.3 detaillierten Konzept entwickelt sich die methodische Vorgehensweise nach Abbildung 5-2 für den Umsetzungsprozess.

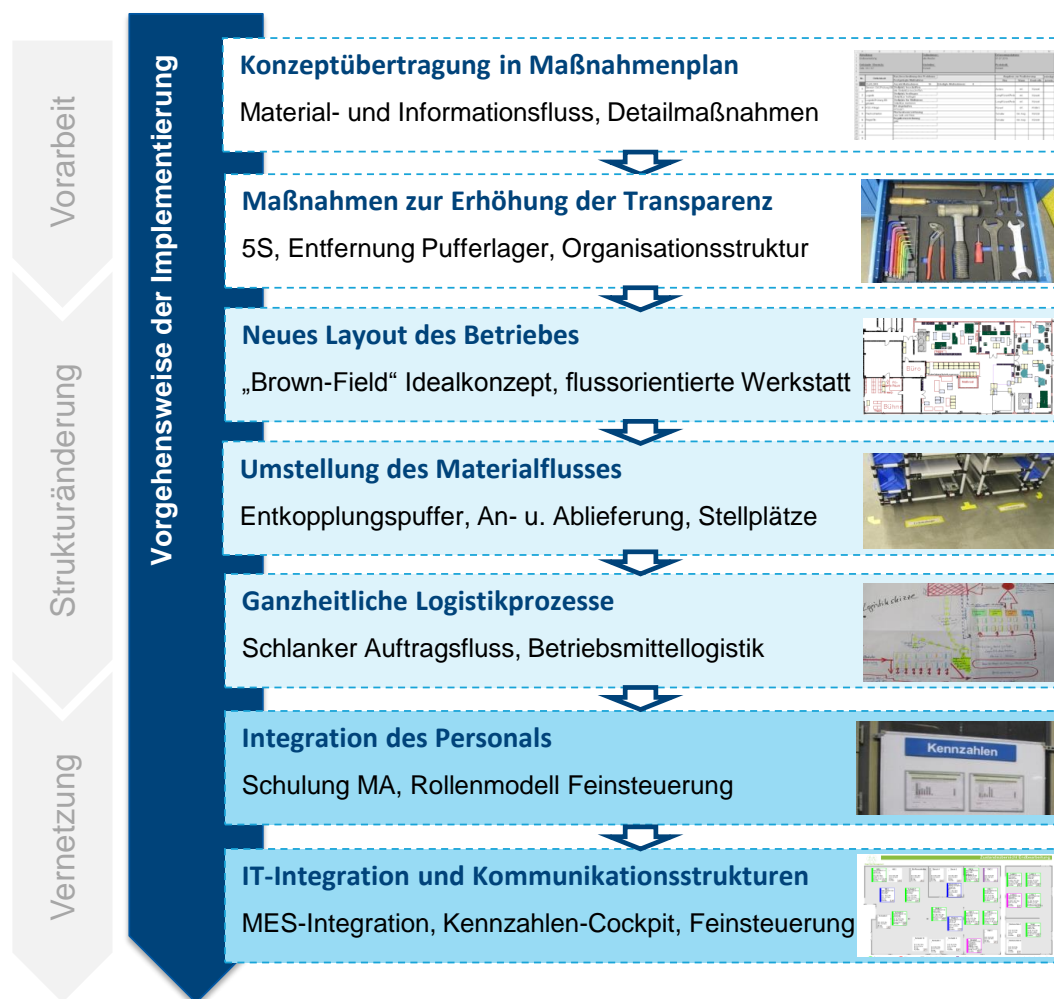


Abbildung 5-2: Umsetzungsmaßnahmen der „flussorientierten Werkstattfeinsteuerung“

Die Pull-Produktion kann im Beispiel durch die Schaffung von Maschinengruppen, auftragsbezogenen logistischen Einheiten und einer auf Stellplätzen beruhenden Intralogistik erreicht werden. Als wesentlicher Faktor zur Etablierung eines flussorientierten Pull-Systems wurde erkannt, dass alle räumlich feststehenden Betriebs- und Hilfsmittel wie Werkbänke, Regale, Transportbehälter, Schränke etc., ausgenommen der Maschinen und Infrastruktur, zu eliminieren sind, um die flussorientierte Werkstattfeinsteuerung umzusetzen zu können. Dies stellt, neben dem Versetzen der Maschinen, die wesentlichen strukturellen Änderungen dar, die in Abbildung 5-3 berücksichtigt sind.

Weiterhin wird hier zwischen Stellplätzen des Auftragsflusses mithilfe des in Kapitel 4 bereits eingeführten Begriffs des „Single-Trolley-Flows“ und Stellplätzen für Hilfsmittel der Arbeitssysteme unterschieden. Darunter sind beispielsweise standardisierte Rüst- oder Werkstattwagen zu verstehen. Bei der Modellumsetzung werden diese Stellplätze farblich unterschieden. Im Einzelauftragsfluss durchlaufen die Aufträge die eingezeichnete Stellplatzstruktur, wobei pro Maschinengruppe ein bis drei Pufferstellplätze berücksichtigt sind, deren Anzahl im Laufe der Umsetzungsphase reduziert werden konnte. Der im Steuerungsmodell als wesentlich beschriebene Pufferbestand zwischen den Modulen „Sintern“ und „Hartbearbeitung“ kann bei der Umsetzung durch das Prinzip eines sog. Bahnhofs abgebildet werden. Der Zu- und Abfluss von Trolleys ist dabei wechselseitig organisiert. Die Reihenfolge im Abfluss und der gesamte Auftragsdurchlauf sind darüber hinaus in die übergeordnete Feinplanung und die lokale Feinsteuerung integriert. Das Prinzip dieses Umsetzungsbeispiels ist in Abbildung 5-4 dargestellt.

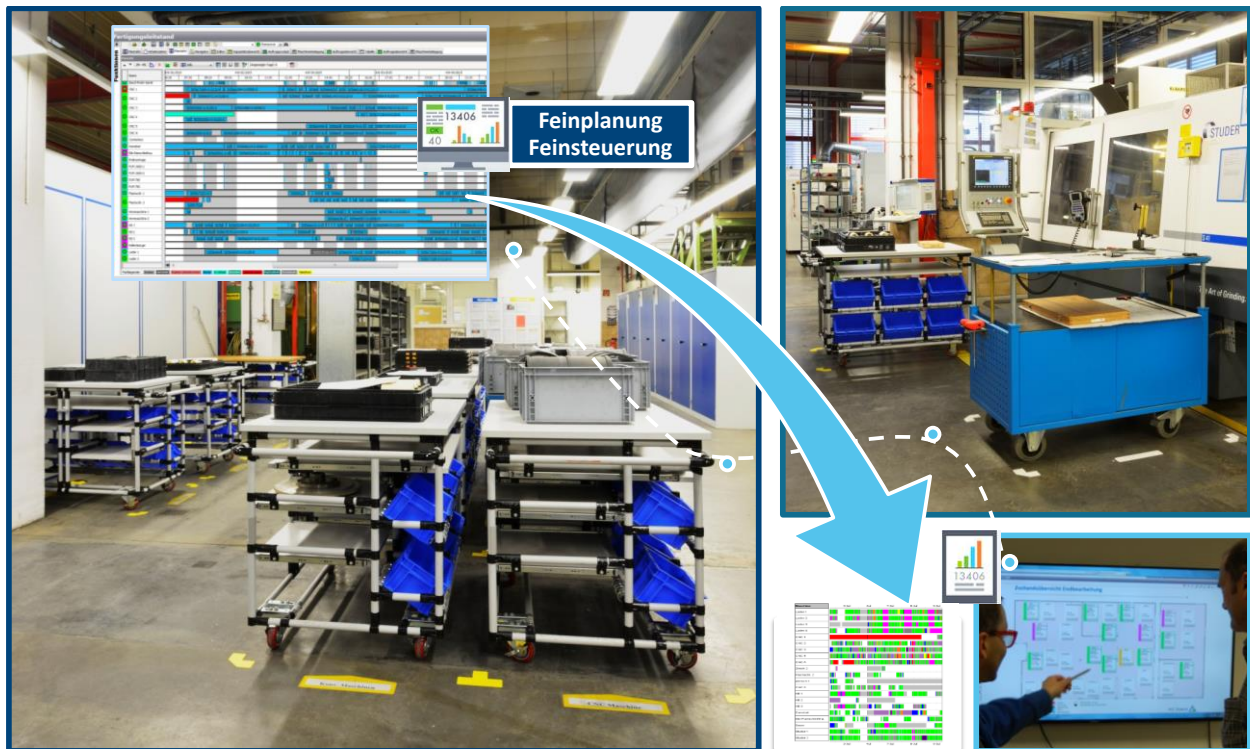


Abbildung 5-4: Beispiel der Umsetzung der Feinsteuerung mithilfe des „Single-Trolley-Flow“

Durch die strukturierte Bewegung aller Aufträge auf standardisierten Trolleys und die Entfernung jeglicher Abstellmöglichkeiten für Aufträge, können keine Auftragspuffer oder unkontrolliert lange Warteschlangen durch Engpassprobleme vor den Arbeitssystemen entstehen. Neben der Eliminierung dieser für die klassische Werkstattfertigung bekannten Nachteile wird auch einer mangelnden Übersicht in der Produktion durch den beschriebenen hohen Grad an Standardisierung und Organisation im Modul entgegnet (vgl. Vor- und Nachteile der Werkstattfertigung in Tabelle 2-3).

Darüber hinaus wird das Prinzip des „Single-Trolley-Flows“ durch eine „Single-Trolley-Logistik“ ergänzt. Die Gestaltung der Trolleys berücksichtigt dabei neben den Werkstücken, geeignete Ablagen für Hilfs- und Betriebsmittel sowie die Werkzeuge für die Hartbearbeitung, wie beispielsweise jegliche Art von Schleifmitteln. Die Abbildung 5-5 stellt ein Umsetzungsbeispiel dar, wie eine auf Einzelaufträge und einen komplexen mehrstufigen Hartbearbeitungsprozess bezogene Logistik realisiert werden kann. Innerhalb eines standardisierten und strukturierten Bereiches zur Werkzeug- und Hilfsmitteldisposition (Bereich A) werden alle auftragsbezogenen Hilfsmittel, wie z. B. Werkzeuge, Vorrichtungen und Messmittel definiert in den Behältern der „Single-Trolleys“ abgelegt. Im Anschluss bewegen sich diese zur weiteren Auftragssteuerung in den benannten Bahnhof (Bereich B).

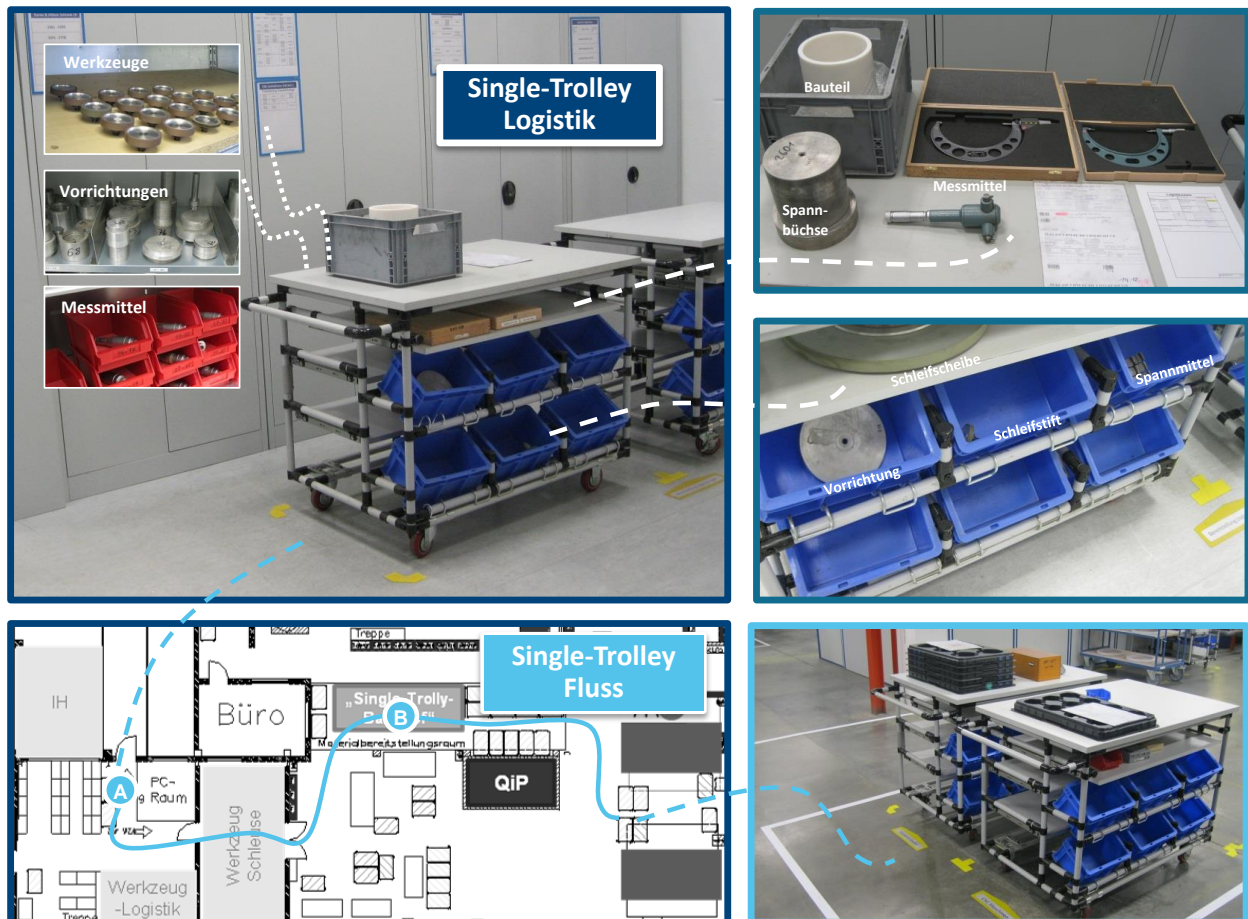


Abbildung 5-5: Beispiel der ganzheitlichen Logistikprozesse in der Werkstattsteuerung

Dieses Beispiel zeigt, wie sich verschwundungsarme und transparente Prozesse durch das entwickelte Konzept der flussorientierten Werkstattfertigung etablieren lassen. Die Vorgänge in der Ausführungsebene gewinnen dadurch für die Mitarbeiter und steuernden Führungskräfte sowie auch für Außenstehende, wie Mitarbeitern der zentralen PPS, eine wesentlich höhere Transparenz und damit auch die Möglichkeit weiterer zielgerichteter Optimierungsmöglichkeiten.

Beispielsweise nehmen die lokalen Steuerungsverantwortlichen die aktuelle Position, den Status von Aufträgen oder gerade entstehende lokale Engpasssituationen trotz einer Werkstattstruktur durch einfache nachvollziehbare Visualisierung bewusster und damit schneller wahr. Erst auf Basis dieses höheren Reifegrades der Organisation in der Ausführungsebene können weitere Gestaltungsmaßnahmen für Mensch und Technik sinnvoll implementiert werden, da durch die fixierte Struktur, Freiheitsgrade gezielt eingeschränkt werden.

5.2.2 Prozessstrukturen in der Information und Kommunikation

In Abstimmung zur Organisation schafft die Vernetzung der Maschinen mit der Schnittstelle über ein MES-System mit der ERP-Planungsumgebung eine zusätzlich verbesserte Visualisierung und Kontrolle. Innerhalb eines weiteren Projektes wurde dazu mit Unterstützung eines Softwareherstellers ein echtzeitfähiges und ERP-integrierbares MES-System³⁹ nach dem in Abschnitt 4.4.4 beschriebenen Konzept adaptiert und implementiert. Die Akteure im PPS-System (vgl. 2.1.3) erhalten zur gleichen Zeit Informationen über Auftragsbelegung, Probleme bei Stillständen oder Abweichungen von Rüst- und Produktionszeiten. Über Terminals, Visualisierungsmonitore und eindeutigen durchgängigen Methoden der Feinsteuerung wird eine Wertstromorientierung erreicht und die Abläufe transparent und digitalisiert dargestellt. Die Abbildung 5-6 stellt diese beispielhafte Integration von hochauflösenden Produktionsdaten in die flussorientierte Werkstattsteuerung dar.

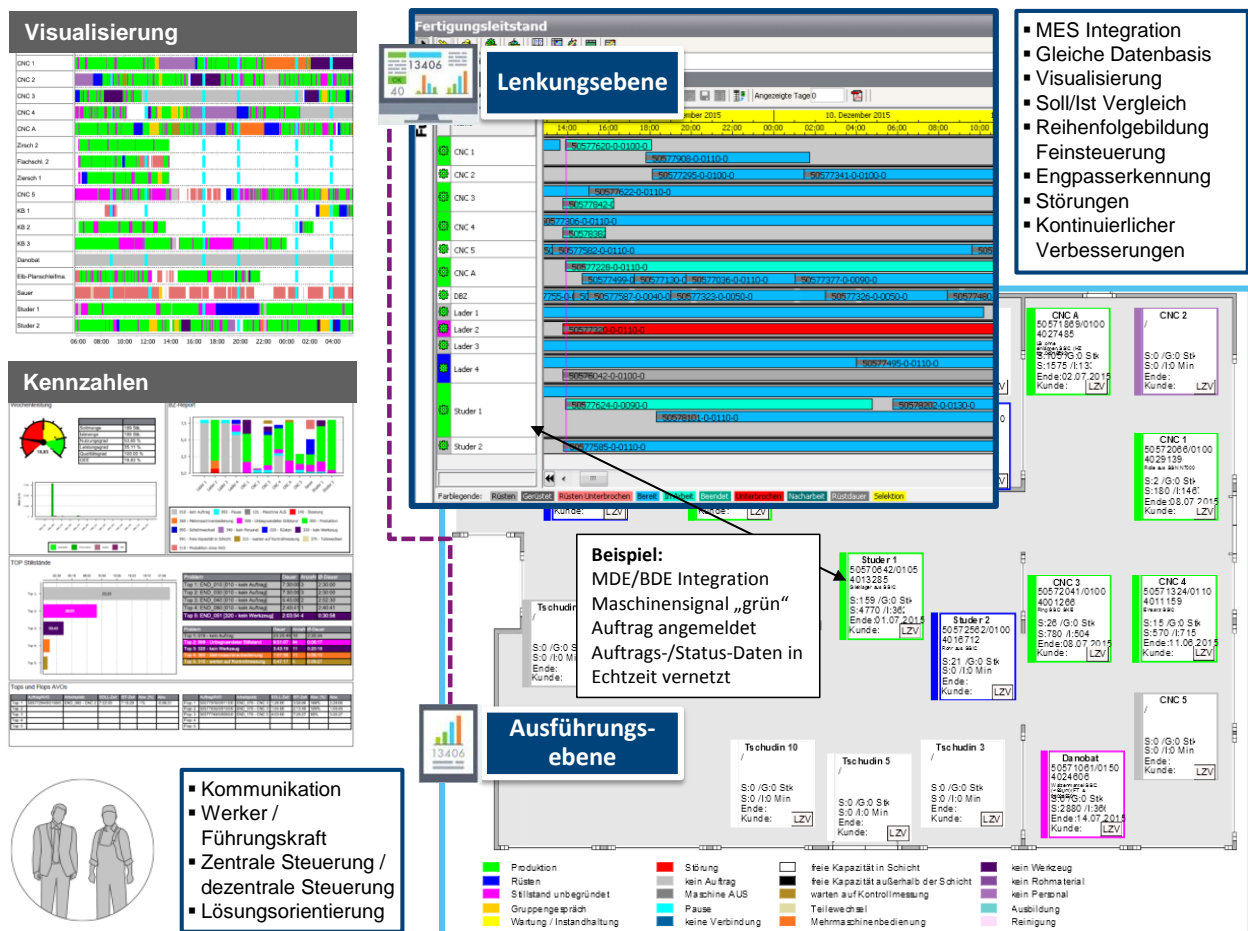


Abbildung 5-6: Beispiel der IT-Integration in die flussorientierte Werkstattfeinsteuerung⁴⁰

³⁹ Im beschriebenen Beispiel wird die Kombination aus dem System SAP® ERP 6.0 und dem MES-System Forcam® FactoryFramework verwendet.

⁴⁰ vgl. Anhang C

In der Ausführungsebene wird die im Vorkapitel beschriebene Organisationsstruktur visualisiert, wobei über eine Web-Anwendung zeitgleich im gesamten Netzwerk die Visualisierungen betrachtet werden können. Die Sensorik nimmt dazu Maschinendaten auf, die mit Betriebsdaten aus den Terminals und Planungsdaten, wie beispielsweise geplanter Instandhaltung, verknüpft und in Form von logisch definierten Betriebszuständen ausgegeben werden (siehe Farb-Legende in Abbildung 5-6). Diese hochauflösende Datenbank steht in der Lenkungebene in gleicher Art und Weise zur Verbindung mit Auftragsplandaten im Fertigungsleitstand zur Verfügung. Weiterhin werden die wesentlichen Zustände auch innerhalb der Werkstattfertigung für die Werker mit MES-vernetzten Ampeln und den Maschinenterminals visualisiert.

In Kombination mit der in 5.2.2 beschriebenen Organisationsstruktur entsteht eine Werkstattfertigung, die einerseits **flussorientiert organisiert** ist, und mit hoher Transparenz **situationsbasiert gesteuert** werden kann. In der lokalen Steuerung kann durch die Echtzeit-Visualisierung aller Zustände erreicht werden, dass Steuerungsentscheidungen mit einem ganzheitlichen Blickwinkel auf die vorliegende Situation im Bereich erfolgen. Der Überblick über die Werkstattfertigung steigt dadurch maßgeblich an. Insbesondere durch das intuitive schnelle Erkennen von Abweichung entsteht die gewünschte **proaktive Handlungsweise**. Die beschriebenen Werkzeuge unterstützen die lokalen Prozessverantwortlichen in der Erfüllung nachfolgender Aufgaben in der betrieblichen Praxis:

- Personalzuteilung zu Maschinengruppen, kurzfristige Personalverschiebung
- Identifikation von Potential zur Mehrmaschinenbedienung bei situationsbezogenen Vorliegen von Auftragskombinationen
- Steuerung von Produktivität und Qualität im heterogenen Produktionsprogramm durch Vergleich der Schichten und Soll/Ist-Vergleich
- Ableitung kurz- und mittelfristiger Verbesserungsinitiativen
- Track & Trace Produkt und Produktivität an Engpassmaschinen
- Reaktionsschnelligkeit bei Prioritätsänderungen und Störungen
- Verbesserung der unzureichenden Stammdatenqualität unausgereifter Produkte

Wesentlich für die lokale Steuerung ist die Kommunikation der Führungskräfte mit den Mitarbeitern über Auftragsfortschritt, Reihenfolgenänderungen, dem feingeplanten Auftragsdurchlauf und etwaiger Auftrags-Kollisionen. Neben der Visualisierung, können bezogene Kennzahlen und Abweichungs-Nachrichten automatisch verteilt werden und Gegenmaßnahmen dadurch sehr schnell initiiert werden. Beispiele dafür sind automatisch pro Schicht verteilte **Kennzahlen-Cockpits**, die neben Leistungskennzahlen auch die längsten Stillstände, Plan-Ist Abweichungen und Differenzen in der geplanten Durchlaufzeit beinhalten. Eine deutliche Verbesserung des lokalen Engpassmanagements und der Beseitigung von dynamischen Störgrößen sind eine Folge davon.

Erst durch die Verbindung der beschriebenen schlanken und verschwundungsarmen Organisation, Digitalisierung der Abläufe und der Integration der beteiligten Mitarbeiter war es hier möglich, das hohe Potential des Konzeptes umzusetzen. Dies wird im nachfolgenden Kapitel 6 anhand der Entwicklung spezifischer Kennzahlen abschließend bewertet. Keines der Gestaltungsfelder ist für sich betrachtet in der Lage, eine derart hoch integrierte Steuerungslösung zu ermöglichen. Umsetzungserfolg ist dabei natürlich eng an die methodische Weiterentwicklung des Personals und das Verständnis für das Konzept gekoppelt. Hierbei kommt besonders der **Kommunikation**, dem **Training** und der **Schulung** eine hohe Bedeutung zu. Das Aufstellen und Kontrollieren von Regeln und Betriebsanweisungen, wie beispielsweise, dass keine Trolleys außerhalb von markierten Stellplätzen abgestellt werden dürfen, ist als weitere praktische Führungsaufgabe äußerst wichtig, damit die beschriebenen Prinzipien auch real im praktischen Betriebsalltag stabil funktionieren.

Durch die Umsetzung der theoretischen Regelstruktur kann das variantenreiche heterogene Fertigungsumfeld wesentlich entwirrt, stabilisiert und die Entscheider mit einheitlichen digitalen schnellen Informationen besser vernetzt werden.

5.3 Beispiel zur funktionsorientierten Inselproduktion

Das Modul Grünbearbeitung und das Konzeptelement der funktionsorientierten Inselproduktion (Einordnung in die Wertschöpfungskette vgl. Abbildung 4-8) sind im Vergleich zur vorher behandelten Werkstattfeinsteuerung von Einzelaufträgen unterschiedlich ausgerichtet. Wenngleich hier die gleichen Aufträge über mehrere Bearbeitungsschritte mit Werkzeugmaschinen bearbeitet werden, ist methodisch betrachtet lediglich die Forderung nach einer höheren Transparenz für die dezentrale Steuerung vergleichbar. Das Konzept der funktionsorientierten Inselproduktion überträgt die Steuerungsaufgaben und -flexibilität vollständig in die Bereichsverantwortung. Aus diesem Konzept leiten sich entsprechende Umsetzungsmaßnahmen nach Abbildung 5-7 ab, die zunächst geplant, umgesetzt und dann in der betrieblichen Praxis getestet wurden.

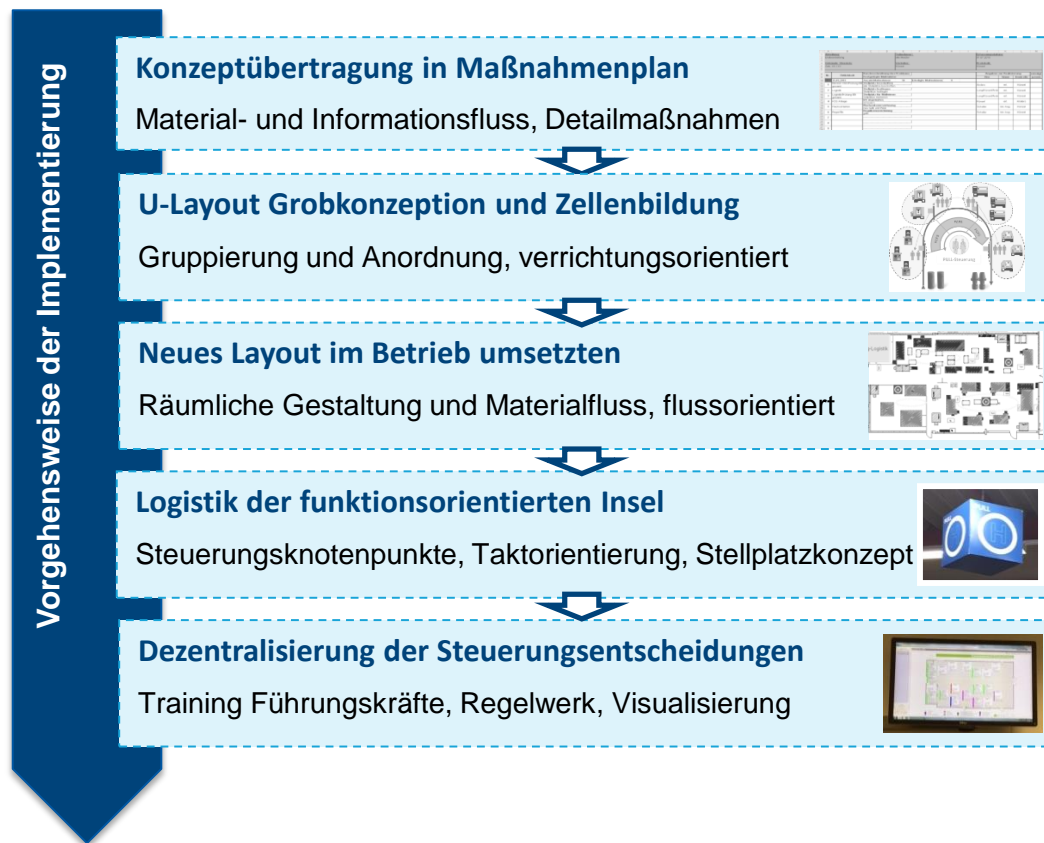


Abbildung 5-7: Umsetzungsmaßnahmen der „funktionsorientierten Inselproduktion“

Die beispielhafte Übertragung der beschriebenen Umsetzungsmaßnahmen führt auch in diesem Modul neben den Veränderungen von Steuerungsprozessen zu strukturellen Veränderungen in der Organisationsstruktur der Produktion.

Zur Überprüfung der detaillierten Wirkmechanismen des Konzeptes (vgl. Abschnitt 4.4.1), erfolgt eine Umstrukturierung der ursprünglich rein verrichtungsorientierten Werkstattfertigung. Dieses Beispiel ist in Abbildung 5-8 dargestellt.

können in einer Maschinengruppe zwei bis sechs Personen parallel tätig sein. Die Flexibilität über das Personal in den Zellen wird durch die situationsabhängige Möglichkeit der **Mehrmaschinenbedienung** ergänzt.

Den Anforderungen des Produktionsprogramms, welche bei den geringen Bearbeitungszeiten in diesem Modul vor allem schwankende Stückzahlen, Rüstzeiten und spezifisches Handling bedeuten, entgegnet die Organisation dadurch strukturell äußerst flexibel. Dezentral wird dabei bestandsorientiert und mit der Taktung pro Verrichtungsschritt gesteuert. Der generelle Ablauf dazu ist in der Abbildung 5-9 dargestellt.

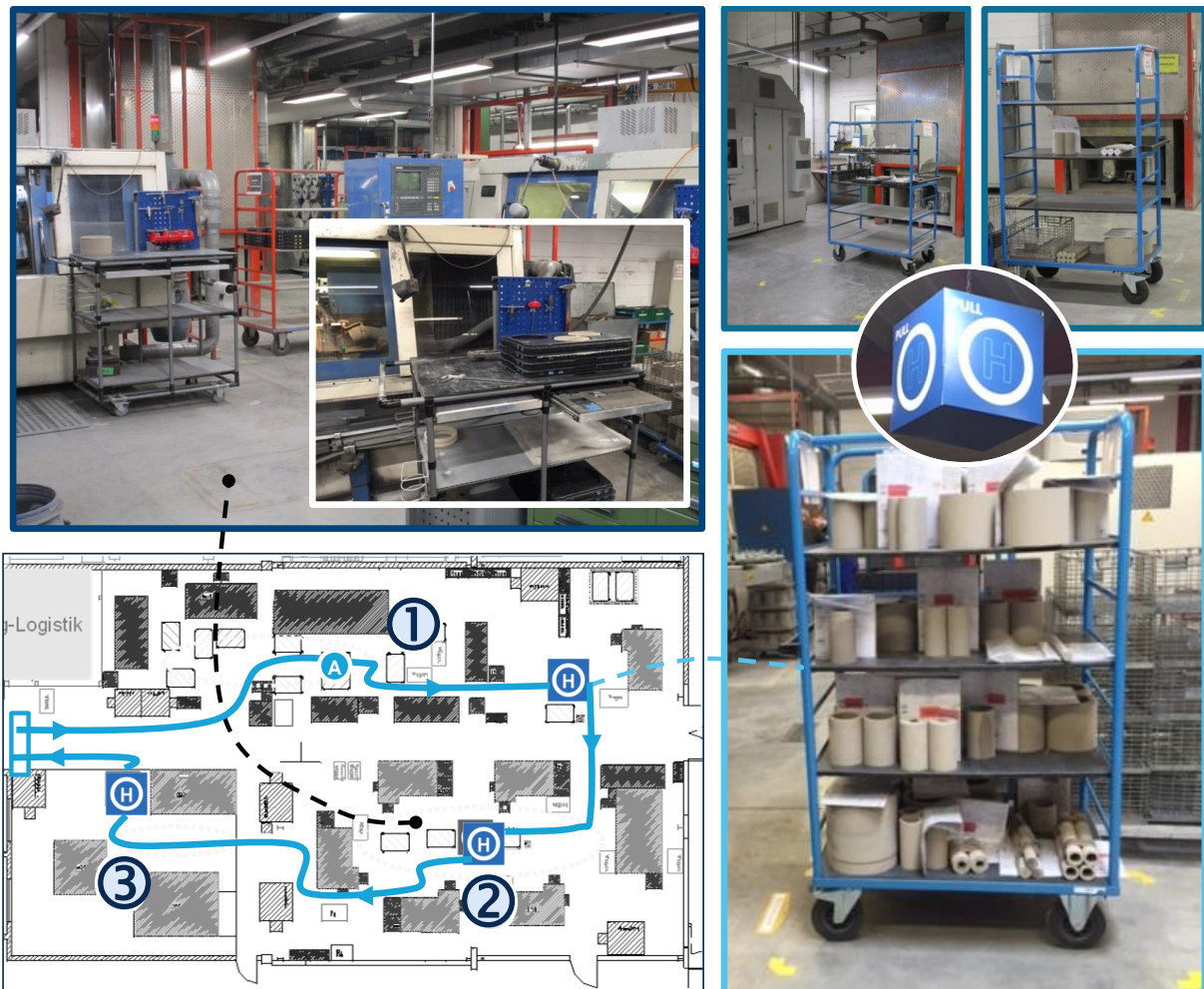


Abbildung 5-9: Umsetzungsbeispiele im Modul Grünbearbeitung

Innerhalb der Insel erfolgt die Taktung an Steuerungspunkten, die in der praktischen Umsetzung durch „**abhängende blaue Würfel**“ visualisiert sind. Dabei kommt ein Pull-orientierter Wagenverkehr von strukturierten Auftragspaketen mit der jeweiligen Folgezelle zum Einsatz (vgl. Abbildung 5-9). Durch die Paketbildung entstehen geringe Entkopplungsbestände, die jedoch zur Flexibilisierung beitragen und im Rahmen der Zielsetzung einer stabilen Durchlaufzeit wieder ausgeglichen werden können. Bei der Gruppierung der Auftragspakete wird nach EDD (vgl. 3.3.1) vorgegangen. Dadurch kann insbesondere die

Reihenfolge der ursprünglichen Auftragsfreigabe gleich gehalten werden. Zwischen den Zellen wiederum erfolgt die Abarbeitung des Auftragspaktes über den Wagenverkehr (siehe Abbildung 5-9) pro Schicht bzw. BKT aus der vorgelagerten Zelle nach First-Come-First-Serve. Die Einzelauftragsfolge innerhalb den Zellen zur Abarbeitung eines begonnenen Wagens wird aufgrund der Bedeutung der Rüstzeiten meist unter Anwendung der rüstzeitoptimierten Reihenfolgenbildung (RzOpt) durch die Mitarbeiter der Zelle bestimmt.

Die gesamte Insel übergreifend gelingt dadurch mit dem Bezug zur Gegenwart die Kapazitätsfeinststeuerung und Reihenfolgebildung. Dabei kommen spezifische Steuerungsgrößen wie beispielsweise der Auftragsanteil je Verrichtungstiefe, Eck-Termin-Reihenfolge, und Bestände an Steuerungspunkten für die Führungskräfte vor Ort zum Einsatz, mit denen sie den Pull-Effekt steuern und das verfügbare Personal zielgerichtet flexibilisieren. Sie fokussieren die reine Erreichung der definierten Standard-DLZ. Das Zusammenwirken der Steuerungspunkte wird dazu insbesondere bei Bestandsdifferenzen oder Leistungsabweichungen aktiv gesteuert. Die Steuerungsentscheidungen können beispielsweise kurzfristige stundenweise Personalverschiebungen in die Engpasszelle oder Korrekturen am Umfang oder der Zusammensetzung der Auftragspakete sein. Schwieriger zu lösende Probleme führen dabei zu einer verspäteten Einlastung in die gesamte Insel und Taktverzug, welches eine Rückmeldung an das vorgelagerte Modul nach sich zieht.

Ein wesentliches Werkzeug hierzu ist die Visualisierung des Wertstroms im Shop-Floor durch die fixierte Organisationsstruktur und dem gelenkten Materialfluss, um einen intuitiven Zugang zu Steuerungsentscheidungen zu gewährleisten. Hochauflösende Produktionsdaten, die im Modul Hartbearbeitung signifikante Verbesserungen im Situationsbezug der Steuerung bewirken, sind hier nur punktuell einsetzbar. Mithilfe der Zulassung vollständiger dezentraler Flexibilität wird die Möglichkeit geschaffen, unausgereifte Prozesse und schwankende Anforderungen bei niedrigen Bearbeitungszeiten dezentral im Rahmen eines Taktes auszugleichen. Produktionsdaten sind hierbei aufgrund nicht planbarer Komplexität nur passiv zur Systemverbesserung vorteilhaft. Daher verwendet man hier lediglich Kennzahlen, Zustände sowie auftragsbezogene Auswertungen, wie beispielsweise die in Echtzeit verfügbare Durchlaufzeit, zur weiteren Verbesserung der Steuerungsrichtlinien.

Eine wichtige Rolle spielt die Befähigung der lokalen Führungsebene in den Elementen der schlanken Produktion und das Verständnis über die Funktionalität der Lösungsansätze auch in Bezug auf die vor- und nachgelagerten Module. Übergeordnet lässt sich durch diese praktische Anwendung **nahezu eine Taktung** erreichen, die zu einer **deutlichen Stabilisierung** der Wertschöpfungskette führt. Der positive Effekt auf die gesamte Produktion stellt die wesentliche Verbesserung dar. Die Transparenz des Materialflusses und der Steuerungskriterien stets weiterzuentwickeln ist für alle beteiligten Mitarbeiter die zentrale Herausforderung, um die betriebliche Praxis zu stabilisieren und den Erfahrungsgewinn positiv zu nutzen.

5.4 Beispiel zur Integration verfahrenstechnischer Parameter

Das Konzeptelement der Integration von verfahrenstechnischen Parametern stellt ein weiteres Beispiel für eine prototypenhafte Umsetzung dar. Aufgrund der festgelegten Umsetzungspriorität konnte dieses Beispiel im Zeitrahmen dieser Arbeit noch nicht vollständig in Bezug auf die Materialflussorganisation und den Informationsfluss umgesetzt werden.

Die theoretische Betrachtung dieses Bereiches zeigt ein Lösungsszenario durch die Schaffung von Transparenz in der Kombination von Verfahrens- und Dispositions-Kriterien im Rahmen der Blockbildung von Aufträgen für die nachfolgende Chargenfertigung (vgl. Konzeptelement in Abschnitt 4.4.2). Dabei gilt es, alle relevanten verfahrenstechnischen Haupteinflussgrößen wie z. B. Bauteilgewicht und -form, Temperaturverteilung und die Apparategröße einzubeziehen, die wiederum die Logistik bestimmen.

Die Produkte teilen sich entsprechend des Materials, das wesentlich den Apparatetyp bestimmt, in einem mehrstufigen thermischen Prozess auf die einzelnen Ofenanlagen auf. Im Beispiel sind das Chargenöfen mit unterschiedlicher Prozessführung, Ofenvolumen und Art und Weise der Bestückung mit Bauteilen für die thermische Behandlung. Die Abbildung 5-10 stellt einen Ausschnitt aus der komplexen Materialflussorganisation dieses Praxisbeispiels dar.

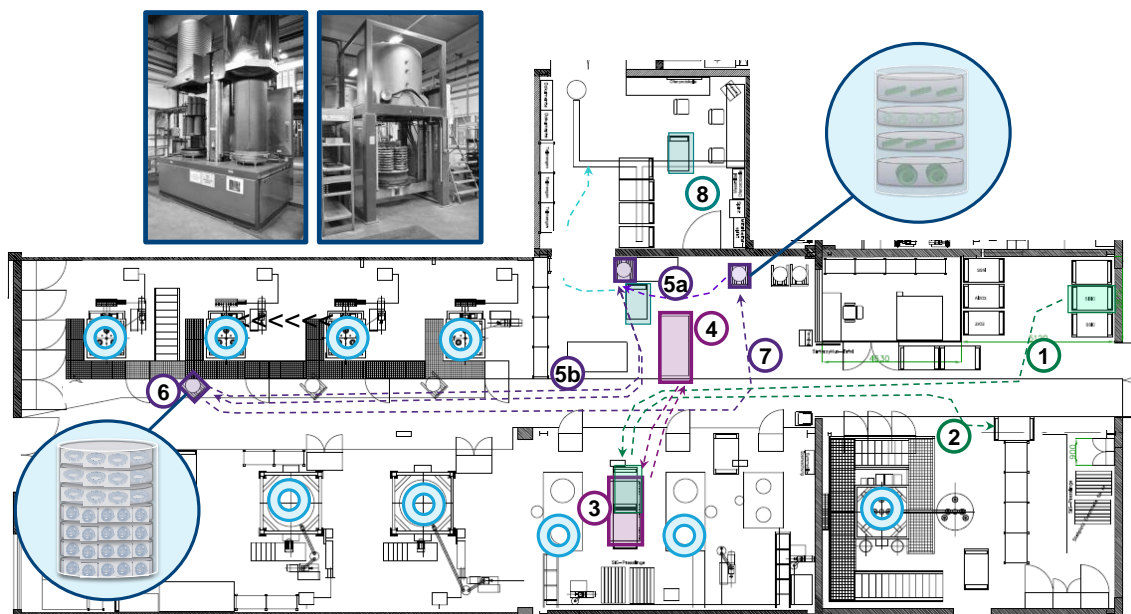


Abbildung 5-10: Beispiel der Materialflusslogistik im Modul Sintern

Aus der Abbildung ist das Layout des Ofenbereichs für das Material Siliziumcarbid (SiC) ersichtlich. Darin ist die Anordnung einzelner Ofenanlagen (Markierung in „blau“) sowie deren unterschiedliche Größe und Peripherie erkennbar.

Der Materialfluss konnte während der Entstehungszeit dieser Arbeit durch ein fachlich angeleitetes Projekt, das durch die operativen Mitarbeiter des Betriebes umgesetzt wurde, nach den Grundgedanken der schlanken Produktion (vgl. 3.5) strukturiert werden. Auf diese verbesserte Organisationsstruktur wird hier im Vergleich zur Ausgangsstruktur jedoch nicht im Detail eingegangen. Durch Methoden wie z. B. 5S und der Beseitigung von Verschwendungen kann die Standardisierung der Abläufe verbessert werden, was aber für sich betrachtet nicht ausreicht, um die Transparenz im Kontext der Produktionssteuerung deutlich zu erhöhen. Die Positionsnummern von 1 bis 8 beschreiben in Abbildung 5-10 die örtlichen Positionen im Materialfluss, die ein Auftrag während der Bearbeitung im Modul Sintern durchläuft. Neben dieser Materialflussorganisation sind die für die Bestückung der Öfen vorbereiteten Blöcke ersichtlich, die exemplarisch an ausgewählten Stellen im Ablauf eingezeichnet sind. Beispielsweise wartet ein Block an der Position 6 auf die Bearbeitung in einer Ofenanlage. Für die weitere Vertiefung der Grundgedanken zur Blockbildung wird an dieser Stelle an die Abbildung 4-13 verwiesen.

Diese beschriebene Optimierung stellt jedoch eine Grundlage dar, um das Konzeptelement zur „**Digitalisierung der verfahrenstechnischen Prozesse**“ weiter umzusetzen. Die Bildung der Blöcke, die dem Auftragsbesatz eines Ofens entsprechen, erfolgt mit der Methode des externen Rüstens, was innerhalb der schlanken Produktion als SMED bekannt ist und bereits zitiert wurde (vgl. [ERL13]).

Das entwickelte Konzept der Blockbildung konnte im Laufe des Projektes in ein MES System integriert werden. Dazu wurde aus den theoretischen Überlegungen aus Kapitel 4 in dieser Arbeit gemeinsam mit den beteiligten Prozessverantwortlichen im Betrieb und der IT zunächst eine **idealisierte Ablaufstruktur**⁴¹ für die Umsetzung von BDE und MDE entwickelt. Die daraus abgeleiteten Anforderungen konnten im Anschluss durch ein Projektteam und mithilfe einer Sonderprogrammierung eines IT-Dienstleisters umgesetzt werden. In diesem betrieblichen Beispiel besteht die Systemumgebung aus dem ERP-System „SAP“ und dem MES-System „Factory Framework“, was in den vorhergehenden Praxisbeispielen bereits benannt wurde. Der grundlegende Ablauf ist allerdings auch mit anderen IT-Systemen realisierbar, wobei insbesondere die Rückmeldelogik und die Struktur des Stammdatenaustausches zwischen dem führenden ERP-System und dem MES-System eine hohe Herausforderung darstellen, die spezifisch betrachtet werden muss.

Die Abbildung 5-11 stellt ein vereinfachtes Beispiel der Umsetzungsergebnisse dar. Die digitalisierten Abläufe der Blockbildung mit dem externen Rüstprozess des Blocks und dessen Fertigungsstart in einer Ofenanlage sind darin visualisiert. Die Mitarbeiter stellen in einem organisatorisch strukturierten Ablauf unter Einbezug der beschriebenen Kriterien (vgl. Abbildung 4-13) den Block zusammen und verbinden diese Tätigkeit über lokale Terminals und Barcode-Scanner mit dem IT-System. In der Abbildung sind diese intuitiv

⁴¹ vgl. Anhang D

bedienbaren Touchscreens beispielhaft durch die entsprechenden Screenshots dargestellt. Allerdings existieren in der Praxis diesbezüglich vielschichte weitere Abwandlungen, wie beispielsweise die Splittung von Aufträgen auf mehrere Blöcke, die Meldung von Ausschuss und Nacharbeit, oder die nachträgliche Veränderung der Blockzusammensetzung, die hier nicht vollumfänglich beschrieben werden können.

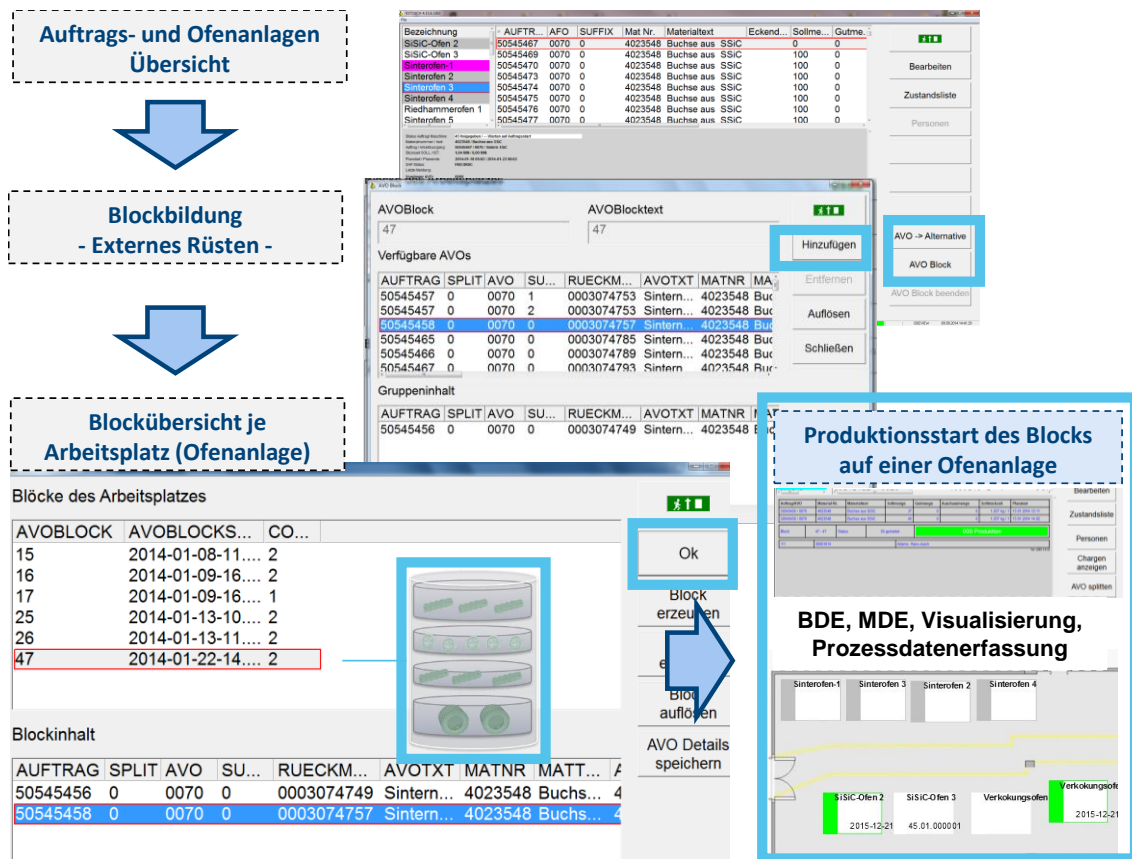


Abbildung 5-11: Vereinfachtes Beispiel - Blockbildung im MES-System

Durch die vollständige digitale Abbildung des Prozesses wird das in der Theorie konzipierte „**Track & Trace**“ der Produkte, der verfahrenstechnischen Parameter und der Zusammensetzung der Blöcke möglich. Auf dieser Basis sind die im Konzeptelement beschriebenen weiterführenden Analysen und die Umsetzung des beschriebenen „Produkt-Prozess-Clusters“ möglich.

Ein Auswertebispiel in Abbildung 5-12 zeigt dazu anhand einer Auftragsliste exemplarisch die erreichte Transparenz. Aufträge, die einem Block zugewiesen sind und sich bereits in der thermischen Behandlung in einer Ofenanlage befinden, werden beispielsweise „grün“ hinterlegt. Die Spalten zeigen exemplarisch Arbeitsplätze und einige Verfahrens- und Dispositions-Kriterien, wie Stückzahl, eine etwaig erfolgte Blockzuweisung oder den Materialtyp. Der Faktor „A zu U“, der als Maß für die geometrische Komplexität definiert

wurde, bestimmt z. B. maßgeblich die Prozessführung für den Sinterprozess, was in der in der Theorie des Konzeptes (vgl. 4.4.2) bereits erläutert wurde.

AVO-Verwaltung

Parameterauswahl

Auftrag:

AVO:

Bearbeitungsstatus von 45 - freigegeben bis 89 - beendet

Arbeitsplatz:

Arbeitsplatzgruppe: S002 - S002

Soll-Start von bis

Soll-Ende von bis

Mat.-Nr:

AVO-Block:

**Beispiel: Auftrag aktuell in Produktion
Arbeitsplatz (Ofenanlage): OFE_040
Bearbeitet in Block: Nr. 749
Prozessführung: 1,17
Geometrieverhältnis (A zu U): NN**

Suchergebnis

Auftrag	Materialtext	Arbeitsplatz	Sollmenge	Ist-Menge	AVO-Block	Dehnung	Einzelteilgewicht	Keramikmasse	A zu U
50570826	Gründichte aus SSiC, SKE, kor.Preßdr		7 St.	6 St.				SSiC SKE	
50574676	LB ohne einlappen,SSiC (HZ für 04018792)		100 St.	0 St.				SSiC SKE	0,330
50574678	LB ohne einlappen,SSiC (HZ für 04018792)		100 St.	0 St.				SSiC SKE	0,330
50574682	LB ohne einlappen,SSiC (HZ für 04018795)		100 St.	0 St.				SSiC SKE	0,292
50577276	Gegenring aus SSiC		50 St.	49 St.				SSiC SKE	0,257
50577542	Mahtzylinder aus SSiC (ZP30007/2Stück)		2 St.	0 St.				SSiC SKE	0,588
50577710	Gleitring aus SSiC		157 St.	0 St.				SSiC SKE	0,185
50577710	Gleitring aus SSiC	OFE_040	74 St.	0 St.	749	1,17			
50577721	Ring in SSiC		52 St.	0 St.				SSiC SKE	0,496
50577721	Ring in SSiC		12 St.	0 St.	717	1,17			
50577754	Deckeleinsatz aus SSiC		8 St.	0 St.				SSiC SKE	0,635
50577907	Gegenring aus SSiC		100 St.	0 St.				SSiC SKE	0,454
50578268	Gleitring aus SSiC		5 St.	0 St.				SSiC SKE	0,165
50578300	Lagererinsatz aus SSiC		17 St.	0 St.				SSiC SKE	0,440
50578308	Hexagon (Trapez) aus SSiC		10.000 St.	0 St.				UF15 Premix	0,090
50578308	Hexagon (Trapez) aus SSiC	OFE_030	10.000 St.	0 St.	756	1,17			
50578311	Exzentrerschnecke N15 20° in SSiC		1 St.	0 St.			0,0560		
50578327	Gleitring aus SSiC		87 St.	64 St.				SSiC SKE	0,231
50578327	Gleitring aus SSiC		157 St.	118 St.				SSiC SKE	0,215

Anzeigen Erstellen Ändern Löschen

Abbildung 5-12: Auswertebeispiel zur Digitalisierung der Verfahrenstechnik

Der weitere Umsetzungsweg für dieses Beispiel sieht vor, die erreichte Transparenz sowohl zur lokalen Feinsteuerung innerhalb des Modules Sintern als auch im übergeordneten Steuerungsmodell (vgl. Abbildung 4-8) weiter zu integrieren.

Innerhalb der betrieblichen Praxis stellte bisher vor allem die mangelnde Übersicht über den Auftragsfortschritt, die räumliche Position der Aufträge und die Ofenbelegung ein Informationsdefizit dar, welches einer verbesserten Steuerung entgegen stand. Mit der in diesem Beispiel erreichten Transparenz lässt sich das künftig weiter verbessern. Mit den geschaffenen Strukturen können darüber hinaus die gewonnenen Erkenntnisse aus den Auswertungen zur Clusterbildung genutzt werden, um diese im Rahmen der Auftragsfreigabe bei der Festlegung von Auftragspaketen auch vollständig zu nutzen.

6 Kritische Bewertung und Erfahrungen der Umsetzung

Nachdem durch Fallbeispiele in Kapitel 5 die Anwendung und schrittweise Umsetzung des Steuerungsmodells beschrieben wurde, erfolgt nun eine Bewertung der Maßnahmen. Hierzu wird die Modellanwendung auf Verbesserung durch die vernetzte, wertstromorientierte Produktionsteuerung untersucht und die relevanten Verbesserungstreiber aus der Sicht der praxisnahen Verifikation benannt. Durch den Vergleich von spezifischen logistischen Kennzahlen in deren zeitlicher Entwicklung können die Veränderungen vorher zu nachher quantifiziert werden. Weiterhin bewertet ein kritischer Rückblick die gewählte Vorgehensweise und fragt die Aussagekraft des Modellansatzes nach.

6.1 Interpretation der Ergebnisse

Durch die in Kapitel 5 beschriebene Anwendung und Umsetzung der einzelnen Konzeptelemente des Steuerungsmodells in die betriebliche Realität konnten direkte Effekte auf die logistische Leistungsfähigkeit sowie auch indirekte Effekte über den jeweiligen Umsetzungszeitraum erkannt werden. Im Zeitrahmen dieser Arbeit konnten nicht alle Konzeptelemente vollständig in die betriebliche Praxis implementiert werden. Entsprechend der gewählten Umsetzungspriorität (vgl. Kapitel 5.1) liegt den nachfolgenden Ergebnissen ein unterschiedlicher Betrachtungszeitraum zugrunde.

6.1.1 Ergebnisse im Modul Hartbearbeitung

Im Rahmen der Konzeption konnte gezeigt werden, dass das Konzeptelement der „Flussorientierten Werkstattfeinsteuerung“ eine hohe funktionale Relevanz innerhalb des Steuerungsmodells aufweist. Bei der Implementierung des Konzeptes zeigte sich nachfolgend eine beträchtliche Steigerung der Transparenz und Flussorientierung auch in der Praxis. Um die pulsierenden Bestandveränderungen vor dem Modul flexibel gesteuert, bei gleichzeitig hoher Geschwindigkeit abzubauen, kommt einer niedrigen Durchlaufzeit, geringen Modul-Beständen und übergreifend verschwendungsarmen und transparenten Abläufen eine hohe Bedeutung zu. Erst dadurch ist eine erfolgreiche Realisierung des wertstromorientierten Steuerungsmodells möglich. Die Bewertung berücksichtigt daher primär das Zusammenwirken aller beschriebenen umgesetzten Gestaltungsmaßnahmen auf den Material- und Informationsfluss in der zeitlichen Entwicklung der logistischen Kenngrößen.

Dazu wurde eine Langzeitbetrachtung mit dem Beginn dieser Arbeit über einen Zeitraum von etwa 30 Monaten durchgeführt, die die vollständige Umsetzungsperiode im Modul „Hartbearbeitung“ abdeckt. Die Abbildung 6-1 stellt anhand einer Auswertung die mittleren

ungewichteten Durchführungs-, Durchlauf- und Übergangszeiten (vgl. Formel 6-1, 6-2, 6-3) des Moduls in der zeitlichen Entwicklung gegenüber.

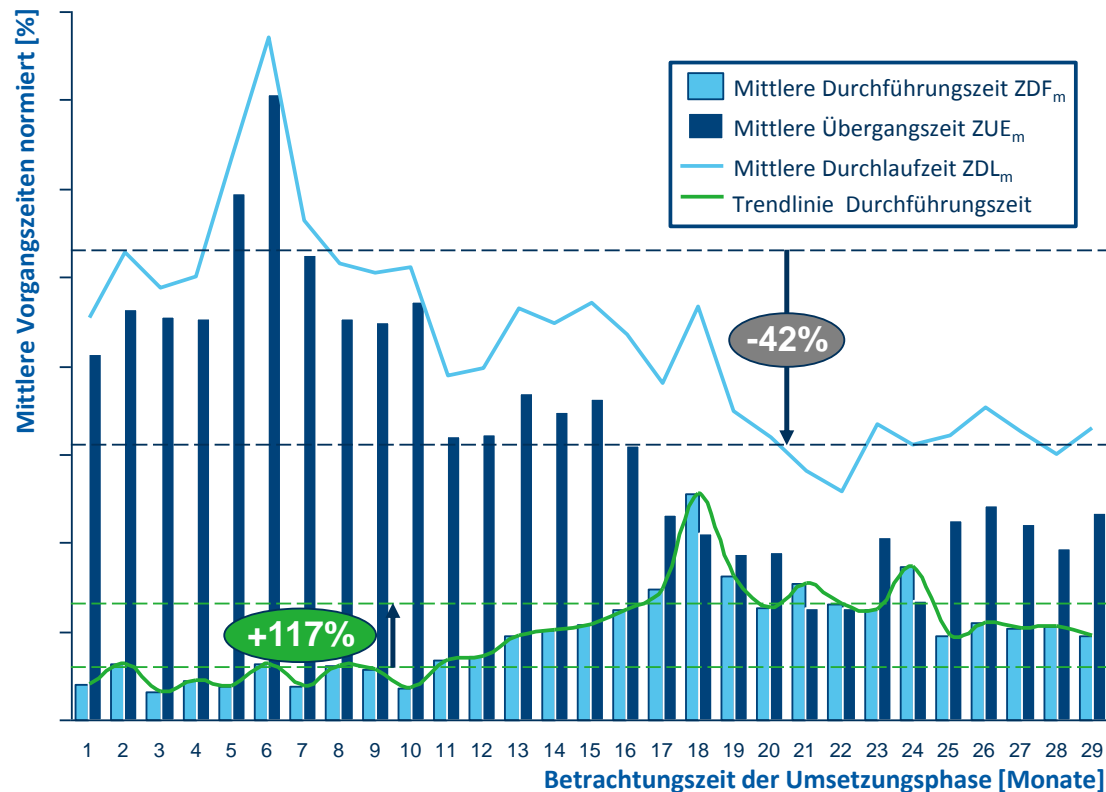


Abbildung 6-1: Entwicklung der logistischen Kennzahlen im Modul Hartbearbeitung

Formel 6-1: Zusammenhang der drei Zeitgrößen für Einzelwerte je Arbeitsvorgang:

$$ZUE_m = ZDL_m - ZDF_m$$

Formel 6-2: Ungewichtetes arithmetisches Mittel der Durchlaufzeit:

$$ZDL_m(t) = \frac{\sum_{i=1}^n ZDL_i(t)}{n(t)}$$

Formel 6-3: Mittlerer Flussgrad:⁴²

$$FG_m = \frac{ZDL_m}{ZDF_m}$$

Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass sich zeitgleich mit den ersten final umgesetzten Maßnahmen, ab den Monaten 8-10, auch die logistischen Kennzahlen verbessern. Dabei verdeutlicht sich, dass mit weiter fortschreitender Umsetzung und Stabilisierung aller Gestaltungsmaßnahmen zwischen den Monaten 10-30 eine **signifikante Reduktion der Durchlaufzeit** erreicht wird, die primär durch reduzierte Wartezeiten begründet ist. Es wird

⁴² Formeln 6.1, 6.2, 6.3 vgl. Logistische Kennlinien nach NYHUIS [NYH12]

eine Gesamtreduktion von 40-50 Prozent über den beschriebenen Zeitraum beobachtet. Ebenso deutlich zeigt sich die gleichzeitige Steigerung der Durchführungszeiten innerhalb aller Arbeitssysteme, die dem Modul zugeordnet sind. Es wird zusammenfassend festgestellt, dass sich durch die nahezu umfassende Anwendung der Flussgrad in der Praxis von FG_m (vorher) $\approx 8,8$ auf FG_m (nachher) $\approx 2,4$ verbessert. Begleitend reduzierten sich die Umlaufbestände um deutlich mehr als 50 Prozent. Die Bewertung beinhaltet dabei alle dynamischen Einflüsse eines realen Produktionsbetriebes, wobei fehlerhafte Rückmelde-daten nicht betrachtet wurden.

Als Ergänzung der bereits beschriebenen Steigerung der Durchführungszeiten wird in Abbildung 6-2 die Entwicklung der mittleren auf Arbeitsinhalte bezogenen Leistung über einen Zeitraum von etwa 20 Monaten dargestellt. Dabei handelt es sich um durch Sensorik über das MES-System generierte Daten der realen Produktionsleistung⁴³, bei gleichzeitiger Maschinennutzung für einen angemeldeten Auftrag.

Formel 6-4: Mittlere Leistung und Auslastung

$$A_m = \frac{L_m}{L_{max}} \cdot 100 = \frac{\sum_{i=1}^n ZAU_{iW}}{P_W \cdot L_{max}} \cdot 100$$

mit ZAU_{iW} = alle fertiggestellten Arbeitsinhalte zum Zeitpunkt i im Modul

P_W = Betrachtungszeitraum 1 Monat

L_{max} = Maximale Leistung (Std/BKT) (Annahme: konstant nach Schichtmodell)

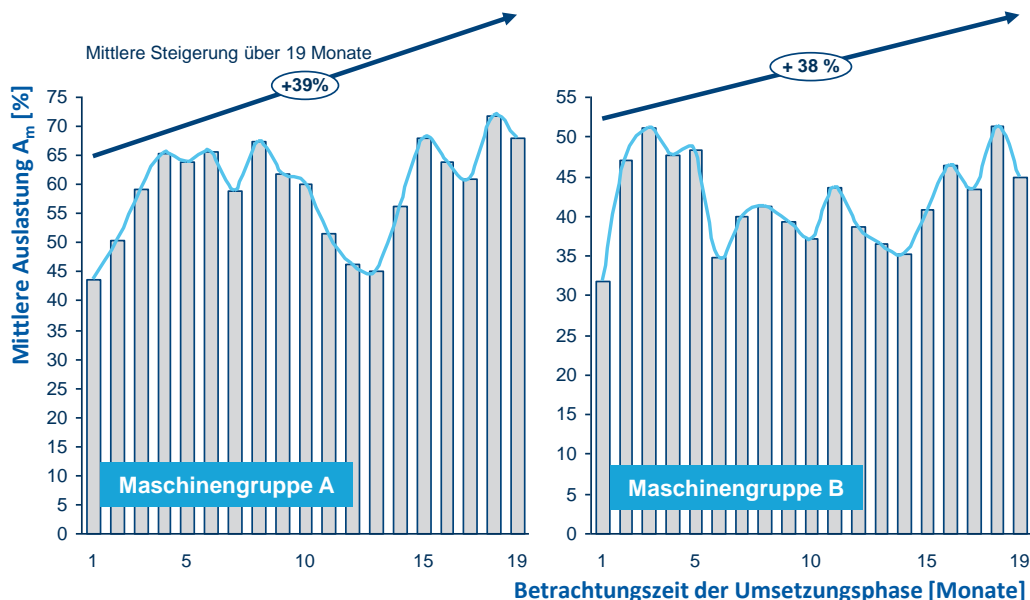


Abbildung 6-2: Entwicklung der mittleren Leistung A_m einer Maschinengruppe im Modul Hartbearbeitung

⁴³ Produktionsleistung wird durch logische Verknüpfung von Maschinensignalen, wie CNC-Programm geladen, Spindel-Drehzahl, und Automatikbetrieb „EIN“ sensorgestützt erfasst.

Die Abbildung stellt zwei Maschinengruppen (vgl. Abbildung 5-3) mit unterschiedlicher zugrunde liegender Produktionstechnik gegenüber. Die erkennbaren absoluten Differenzen sind durch das schwankende Produktionsprogramm erklärbar. Allerdings ergibt sich über beide Maschinengruppen, bei unterschiedlichem Leistungsniveau eine Gesamtsteigerung der mittleren Leistung von deutlich über 30 Prozent über die genannte Betrachtungszeit. Daraus kann eine systematische Verbesserung auf Basis des Konzeptes abgeleitet werden, die durch Stabilisierung in der Industrieanwendung und dem mittelfristigen Betrachtungszeitraum feststellbar wird. Die Steigerung der Leistung und der mittleren Durchführungszeiten aus Abbildung 6-1 zeigen folglich eine zueinander stimmige Entwicklungstendenz.

6.1.2 Ergebnisse im Modul Grünbearbeitung

Die wesentliche Zielsetzung des Moduls Grünbearbeitung im Steuerungsmodell ist die Synchronisation und Senkung der Durchlaufzeiten, um damit eine übergeordnete Stabilisierung zu erreichen. Durch die Übertragung des Konzeptelementes der verrichtungsorientierten Inselfertigung konnte im Kapitel 5 bereits der hohe Mehrwert erkannt werden. Dieser liegt in einer verrichtungsorientierten Flexibilität in den Zellen mit dezentraler Steuerung und der Integration der Zellen im U-Layout mit einer bestandsorientierten Pull-Steuerung.

Die Abbildung 6-3 stellt dazu die vorgangsbezogenen logistischen Zeiten in der Umsetzungsphase gegenüber. Durch die Einführung der funktionsorientierten Inselproduktion konnte auf Basis einer Bestandsreduktion die **mittlere Übergangszeit** bzw. **Wartezeit** und damit die mittlere **Durchlaufzeit** signifikant gesenkt werden. Dabei wurde insbesondere festgestellt, dass erst durch eine vollständige Umsetzung der Organisationsstruktur und der dezentralen Steuerungsprozesse (Zeitpunkt entspricht Monat 9 in Abbildung 6-3) eine Verbesserung erzielt wird. Der Vergleich mit dem im Vorkapitel beschriebenen Ergebnissen des Moduls Hartbearbeitung zeigt, dass die Effekte hier nicht kontinuierlich sondern erst systemintegriert greifen. Im hier bewerteten Modul liegt zudem ein kürzerer Bewertungshorizont für die praktische Anwendung zugrunde, da die erst nach einer vorgelagerten Prototypenphase gestartet wurde.

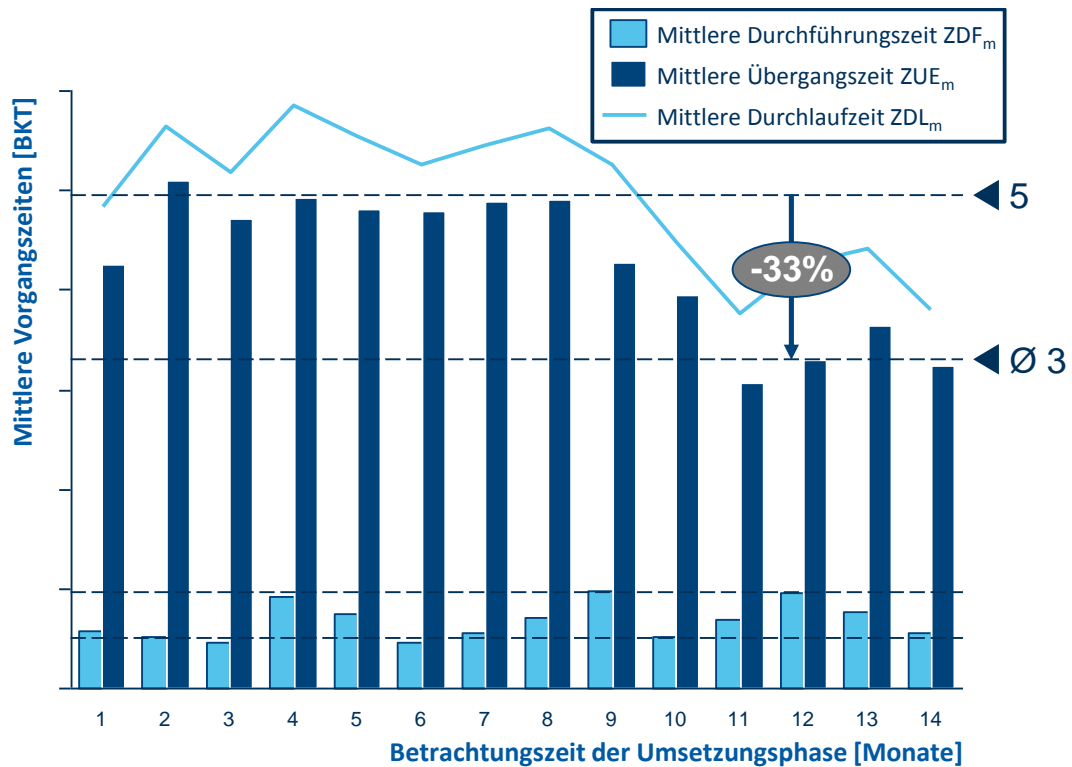


Abbildung 6-3: Entwicklung der logistischen Kennzahlen im Modul Grünbearbeitung

Weiterhin ist aus diesem Diagramm ersichtlich, dass die mittleren Durchführungszeiten keine Trendaussagen zulassen. Dies bestätigt auch eine über die Umsetzungsphase hinausgehende Langzeitbetrachtung der mittleren Auslastung in Abbildung 6-4.

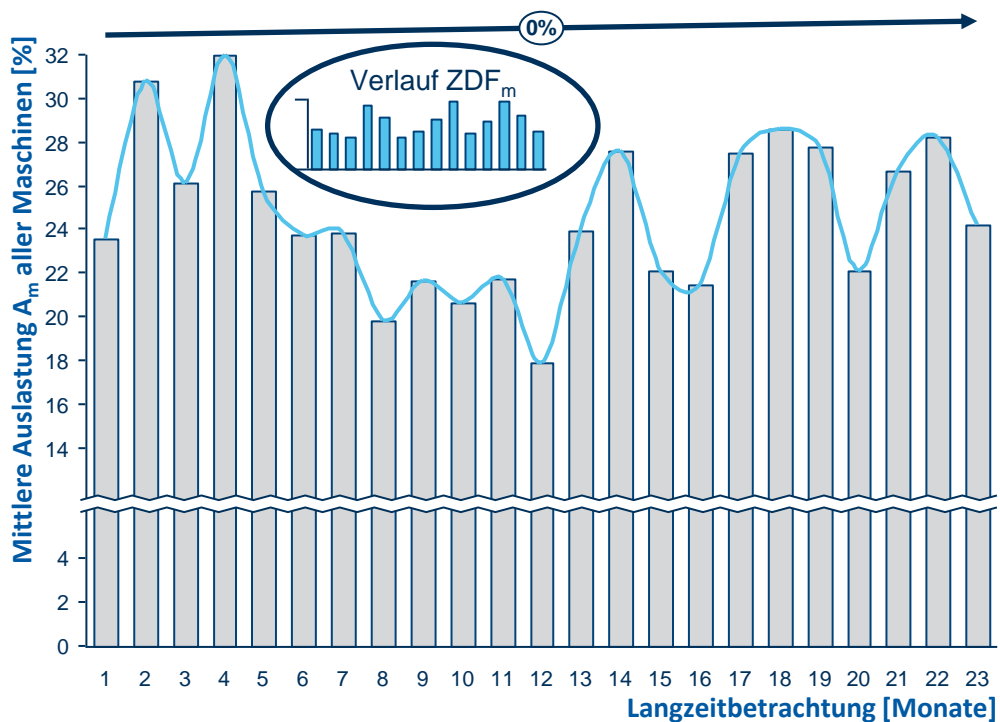


Abbildung 6-4: Mittlere Auslastung A_m im Modul Grünbearbeitung

Aufgrund der kurzen Bearbeitungszeiten und kleiner Losgrößen beeinflussen vor allem Rüst- und Nebenzeiten die Maschinenbelegung. Durch vielfältige Bearbeitungsumfänge werden zahlreiche Maschinen vorgehalten und im Beispiel kann eine ungenutzte Maschinenkapazität festgestellt werden. Entsprechend der mittleren Leistung (vgl. Formel 4-3) schwanken Durchführungszeiten und Auslastungen gleichförmig, welches hier im Wesentlichen an Stückzahlenschwankungen des Produktionsprogramms liegt. Dabei bezieht sich das Diagramm in Abbildung 6-4 auf die aus dem Vorkapitel bekannte Auswertelogik, wobei hier alle Maschinen zusammengefasst wurden.

Es wird gezeigt, dass sich die **Leistung** im Modul Grünbearbeitung **nicht systembedingt verändert**. Lediglich durch die Senkung des Umlaufbestandes von vorher 60-80 Aufträgen im Modul auf nachher 30-40 Aufträge innerhalb der funktionsorientierten Inselfertigung lässt sich die Senkung der DLZ auf 3-4 Tage und die Synchronisierung der Zellen erreichen. Mithilfe von Stichproben von 30-40 Aufträgen kann dieser Synchronisierungseffekt anhand der Häufigkeitsverteilung in Abbildung 6-5 dargestellt werden. Neben der **Verkürzung der mittleren Durchlaufzeit**, zeigt sich dabei auch eine deutliche **Reduktion der Standardabweichung**, die als Maß für die Prozessstreuung gilt.

Formel 6-5: Standardabweichung der mittleren Durchlaufzeit

$$\sigma_{ZDLm} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (ZDL_i - ZDL_m)^2}$$

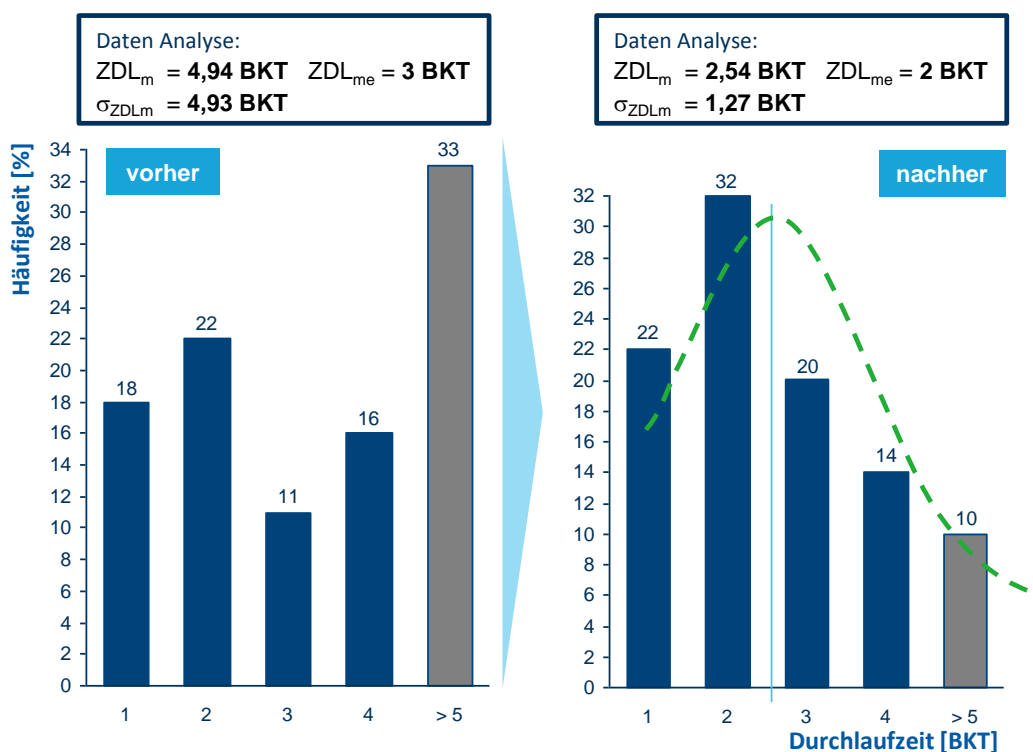


Abbildung 6-5: Vorher/Nachher Häufigkeitsverteilung der Durchlaufzeit ZDL

Aus der Gegenüberstellung wird der positive Effekt der Synchronisierung bereits deutlich. Dennoch existieren in dieser frühen Umsetzungsphase Aufträge mit mehr als 4 Tagen Durchlaufzeit, die meist aus betrieblichen Gründen, z. B. durch fehlende Personalqualifikation im Engpass, verursacht werden. Die **Stabilisierung** dieser verbleibenden Schwankungen ist dabei innerhalb eines Verbesserungsprozesses und steigender Erfahrungen umsetzbar.

6.1.3 Leistungsfähigkeit im Modul Sintern

Aufgrund des in Kapitel 5 beschriebenen Umsetzungsstandes liegt im Modul Sintern noch keine vergleichbare und klar abgegrenzte Langzeituntersuchung der logistischen Verbesserung vor. Vor dem Hintergrund der Synchronisation der Durchlaufzeiten bis zum Zugang in den nachgelagerten Entkopplungspuffer, kommt der spezifischen Modul-Durchlaufzeit dennoch eine hohe Bedeutung zu. Untersuchungen zur logistischen Leistungsfähigkeit in diesem Modul zeigen, eine sehr geringe Schwankung der mittleren Durchlaufzeiten nach Abbildung 6-6.

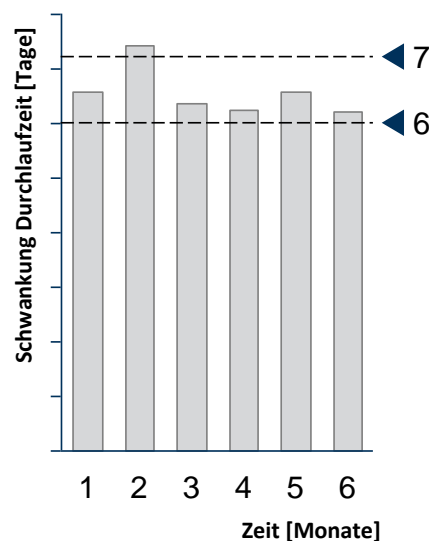


Abbildung 6-6: Mittlere Durchlaufzeit ZDL_m im Modul Sintern

Die Durchlaufzeiten in diesem Modul werden zudem aus der praktischen Bewertung heraus als konstant angenommen und durch sechs Kalendertage bzw. eine Kalenderwoche abgebildet. Sie sind prozessbedingt sehr wenig beeinflussbar (vgl. Annahme im Konzeptelement in Abbildung 4-12). Lediglich durch eine verbesserte Reihenfolgebildung und Taktorientierung vor dem Modul und einem beschriebenen hohen Flussgrad im Anschluss lassen sich die Bestände signifikant reduzieren und gezielt steuern, welches in der Konzeption des Steuerungsmodells damit auch entsprechend abgebildet ist.

6.2 Auswirkungen auf das Steuerungsmodell

Insbesondere durch die Bewertung des Zusammenwirkens der Konzeptelemente können weiterführende Schlüsse auf die Funktionalität des gesamten Steuerungsmodells gezogen werden, der Umsetzungsgrad und die Verbesserungen bewertet und ein weiterführender Handlungsbedarf daraus abgeleitet werden.

6.2.1 Zusammenfassende Bewertung

Durch die direkten Verbesserungen der logistischen Kenngrößen zeigt sich der **Erfolg einer praktischen Implementierung** des Steuerungsmodells im Modul Hartbearbeitung. Dabei lassen auch die indirekten Verbesserungen in diesem Modul Schlüsse auf das Gesamtkonzept und andere Konzeptelemente zu. Mit den beschriebenen Ergebnissen gilt die **Funktionalität der flussorientierten Werkstattfeinsteuerung** und des Entkopplungspuffers innerhalb des Steuerungsmodells als erfolgreich **verifiziert** und in der praktischen Anwendung **als erfolgreich erprobt**.

Anhand der beschriebenen Ergebnisse und der Synchronisierung der Durchlaufzeiten im Modul Grünbearbeitung lässt sich eine **deutliche Verbesserung** feststellen, welches auf die Re-Konfiguration der Produktionssteuerung zurückzuführen ist. Durch prototypenhafte Implementierung und einige Monate Erfahrungsgewinn in der realen betrieblichen Praxis gilt der Wirkmechanismus der funktionsorientierten Inselfertigung als geeignet zur Synchronisation und zellenweisen Taktung einer verrichtungsorientierten komplexen Auftragsfertigung. Trotz einer hohen prozess- und produkttechnischen Komplexität kann durch die stufenweise Nivellierung in der Prozesskette der Auftragsfertigung das Potential für übergeordnete Stabilisierungseffekte in die vor- und nachgelagerten Module bereits beobachtet werden.

Mithilfe des beschriebenen Beispiels zur Integration der verfahrenstechnischen Parameter in die Produktionssteuerung konnte ein **Umsetzungsweg zur Steigerung** der Transparenz im **Modul Sintern** dargestellt werden. Auf dessen Basis ist die Weiterführung dieses Konzeptes in die Auftragsfreigabe möglich. Erste praktische Versuche zeigen dabei, dass durch kurzfristige Auftragsfreigabe auf Basis eines Ofentaktes ein synchronisierter Ablauf über die Module Grünbearbeitung und Presserei durch Rückwärtsterminierung und standardisierte Durchlaufzeiten umgesetzt werden kann.

6.2.2 Bewertung des Umsetzungsgrades

Durch die schrittweise realisierte Umsetzung der Konzeptelemente des Steuerungsmodells, wird die vernetzte, wertstromorientierte Produktionssteuerung in großen Teilen als aussagekräftig zur Optimierung der verfahrenstechnisch verketteten Werkstattsteuerung bewertet und in der derzeitigen Produktion weiter umgesetzt und optimiert. Insbesondere

durch die vollständige industrielle Umsetzung der in Kapitel 4 bereits fokussierten Funktionalitäten der Module Grün- und Hartbearbeitung, bestätigt sich das hohe Potential dieser Lösung erstmalig auch in der betrieblichen Praxis.

Dabei konnten zudem die wichtigsten Hypothesen, auf die sich die Konzeption des Steuerungsmodells stützt, durch praktische Beispiele und eine längerfristige Bewertung der Umsetzung überprüft werden. Die Dezentralisierung von einzelnen Steuerungsaufgaben gelingt durch die Schaffung von Regelkreisen in der Ablaufstruktur der Werkstattfertigung und der bewussten Einbindung der Mitarbeiter in die Steuerung. Durch die strukturelle Einschränkung der hohen Dispositionsfreiheitsgrade, geeigneter Richtlinien für den Materialfluss und ein für die klassische Werkstattfertigung überdurchschnittliches Maß an Standardisierung lässt sich trotz einer komplexen Ablaufstruktur eine angepasste Fluss- und Pull-Orientierung betrieblich umsetzen.

Mit dem Auftragspaketfluss im Modul „Grünbearbeitung“ und dem „Single-Trolley-Flow“ im Modul „Hartbearbeitung“ können unterschiedliche Materialflussprinzipien steuerungstechnisch abgebildet werden. Einerseits gelingt dadurch die Stabilisierung der Prozesskette durch annähernd gleiche Durchlaufzeiten. Andererseits ermöglicht der transparente Einzelfluss einen hohen Flussgrad, nachgewiesene Pull-Funktionalität auf entkoppelte Bestände und transparente Feinsteuerungsmöglichkeiten. Dadurch erreicht man auch im Realsystem eine Entkopplung der Bestände und die zielgerichtete Möglichkeit, das System an Engpässen und dem Schrittmacherprozess der Chargenfertigung auszurichten.

Obwohl das vernetzte Steuerungsmodell, die Integration der bisherigen Erkenntnisse in die Auftragsfreigabe betreffend, noch nicht vollständig erprobt werden konnte, zeigt sich, dass die modellhafte Betrachtung die Wirkmechanismen nachvollziehbar erklärt. Die von den einzelnen Konzeptelementen ausgehende Stabilisierung der Prozesskette isoliert dabei zentrale Eingriffspunkte. Diese konnten beispielsweise in Form der Entkopplung des Auftragspuffers zwischen den Modulen „Sintern“ und „Hartbearbeitung“, der Gesamtkapazität im Modul „Grünbearbeitung“, und dem Einbezug verfahrenstechnischer Parameter auch beispielhaft getestet oder umgesetzt werden.

Weiterführend ermöglichen erst diese Erkenntnisse die Schlussfolgerung, in welchem Umfang auch der Einbezug der Produktionsplanung in das Modell sinnvoll zu gestalten ist, um die zentrale Steuerung in die PPS einzubinden. Hieraus ergibt sich der wesentliche Handlungsbedarf für nachfolgende Arbeiten.

6.2.3 Kritische Bewertung der Vorgehensweise

Zur Entwicklung und anschließenden Anwendung der vernetzten, wertstromorientierten Produktionssteuerung wurde ein empirisch induktiver Ansatz gewählt. Anhand dieser Vorgehensweise wurde aus dem Wertstrom und der empirischen Beobachtung eines Ausgangssystems ein Idealkonzept modelliert, um die Wirkzusammenhänge aus dem Blick-

winkel der Prozesskette heraus zu verstehen und in idealisierte einfache Steuerungsabläufe zu abstrahieren. Diese Vorgehensweise wurde deshalb gewählt, da inhomogene Planungsvorgaben und -stammdaten in der Auftragsfertigung von komplexen Teilen aus Sinterwerkstoffen vorliegen und damit die Produktionssteuerung ihre Aufgabe zur Umsetzung der Produktionsplanung nicht erfüllen kann.

Die getroffene Annahme, dass die **Prognosequalität** in einem derartigen System erst durch eine **übergreifende Transparenz** und die **Beherrschung von Dynamik und Komplexität** erhöht werden kann, ist ein grundlegender Gedanke dieser Arbeit. Eine etwaige Alternativkonzeption, die Planungssystematik beispielsweise nur durch Anbindung hochauflösender Rückmeldedaten aus dem Shop-Floor zu verbessern, kann zweifellos die Planungstransparenz steigern, aber die Probleme im Wertstrom aufgrund der hohen Komplexität hier nicht ganzheitlich lösen.

Der Ansatz, die Probleme mit einer **gezielten Stabilisierung**, die von den Modulen ausgeht, zu beherrschen zeigt dabei **Erfolge**, die Prozesskette effektiv zu stabilisieren. Daraus leiten sich synchronisierte Schnittstellen ab, die in wesentlich einfacherer Art und Weise in die Planung der Wertschöpfungskette einbezogen werden können. Die übergreifenden Probleme hoher Bestände und langer Wartezeiten sowie die Auswirkungen von Engpassproblemen zeigen sich erst dadurch und sind isoliert betrachtet lösbar. Die hier gewählte Vorgehensweise hat bestätigt, dass sich Schnittstellen über ganzheitliche Veränderungen im Produktionssystem und transparente Steuerungsprozesse in der Ausführungs- und Lenkungebene konzipieren lassen.

In dieser Arbeit konnte bisher jedoch nicht gezeigt werden, dass diese Schnittstellen dadurch auch effektiver geplant werden können. Die vollständige logistische Leistungsfähigkeit, bestimmt durch kurze planerische Durchlaufzeiten und eine hohe Termineinhaltung, kann mit den hier gelegten Grundlagen erst weiterführend nachgewiesen werden. Mit einer hohen Wahrscheinlichkeit ist dennoch festzustellen, dass der Anteil der zentralen Steuerung dieser Lösung und die Planungsaufgaben, insbesondere die der mittelfristigen vorausschauenden Kapazitätsterminierung, dazu verschmelzen müssen.

Die Planung und die zentrale Steuerung gehen dabei weiter ineinander über. Die Führungsgröße der Auftragsterminierung durch den Auftragsbestand und den Kundenwunsch sowie die Stellgröße aus der zentralen Steuerung bilden die Entscheidungslogik der kurzfristigen **Auftragsfreigabe**. Hiermit lassen sich kurze Durchlaufzeiten im Auftragsabwicklungsprozess der Auftragsfertigung planen und es kann eine höhere zeitliche Flexibilität für die vorgelagerte Planung und Disposition entstehen. Dieses Potential entsteht jedoch erst, je weiter die hier gewonnenen Erkenntnisse mit den Abläufen der Produktionsplanung in Verbindung gebracht und optimiert werden.

6.3 Spezifische Erkenntnisse und Erfahrungen der Umsetzung

Mit der Umsetzung des theoretisch entwickelten Steuerungsmodells in die betriebliche Praxis, sind bereits signifikante Verbesserungen in den logistischen Kennzahlen belegbar. Die praktischen Erfahrungen dieser Arbeit sind dabei insbesondere an die tiefgehende Verbindung von operativen Mitarbeitern und Produktionssteuerung gekoppelt. Durch die Anwendung des entwickelten Steuerungsmodells werden nicht nur Steuerungsvorgaben umgesetzt und Aufgaben definiert, sondern die Mitarbeiter aktiv zur Teilnahme an der Steuerung befähigt, damit die gewünschte Flexibilität auch entstehen kann. Zur Erreichung eines hohen Reifegrades in der Umsetzung, kommt es daher auch auf die spezifischen Erfahrungen der Mitarbeiter an.

Neben den vielfach benannten technischen und organisatorischen Kriterien spielen dabei vor allem Werte, Regeln und eine geeignete Führungs- und Verbesserungskultur eine wichtige Rolle. Die Grundsätze des Steuerungsmodells stellen oft einen Paradigmenwechsel in der Arbeitsorganisation vieler Mitarbeiter dar. Insbesondere in einer auftragsbezogenen flexiblen Kleinserienfertigung müssen dazu auch die Qualifikationsprofile der Mitarbeiter flexibilisiert werden. Die spezifischen Erfahrungen in der Umsetzungsphase dieser Arbeit zeigen, dass Schulung und Information eine wichtige Grundlage dafür darstellen. Als wesentlich konnte aber die Fokussierung auf wenige Themen und die vollständige fachliche Begleitung während der Implementierung erkannt werden, damit die Ideen dieses Steuerungsansatzes innerhalb einer bestehenden Struktur auch Wirkung entfalten.

Weiterhin zeigt sich, dass ohne strukturelle Änderungen im Shop-Floor, die den lokalen Führungskräften die vorliegende Produktionssituation einfacher visualisiert, eine derartige Werkstattsteuerung nur sehr eingeschränkt dezentral gesteuert werden kann. Die Kenntnis über den Auftragsfortschritt zu jeder Zeit durch Digitalisierungstechnologien ergänzt das nachfolgend vielmehr und führt zu noch höherer Transparenz.

Ein hoher Mehrwert entsteht jedoch erst durch die **Kombination** der beiden Methoden der Standardisierung und Digitalisierung und die Vernetzung der Ausführungs- mit der Lenkungsebene. Dies zeigt sich beispielsweise in beträchtlich gesunkenen Such- und Dispositionszeiten und einer deutlich kooperativeren und lösungsorientierten Kommunikation, die nicht unmittelbar messbar und damit darstellbar ist. Die in der Ausgangssituation beschriebenen häufigen Probleme von unzufriedenen Anwendern und dem Bestreben das PPS-System zu umgehen (vgl. Kapitel 2) sind vermehrt in **standardisierte Abläufe** mit **klaren Regeln** übergegangen. Auch die praktische Erfahrung im Umgang mit fließenden und entkoppelten Werkstattaufträgen liefert Erkenntnisse, um die hohe Beziehungsvielfalt der heterogenen Auftragsfertigung von Sinterbauteilen nachhaltig zu verbessern.

Neben den logistischen und organisatorischen Verbesserungen sind durch die Umsetzung auch erste finanzielle Effekte in der betrieblichen Praxis zu erkennen. Diese wirken sich insbesondere durch die im Kapitel 6 beschriebene Bestandssenkung des Umlaufbestan-

des positiv auf das gebundene Kapital im Unternehmen aus. Weiterhin steigt mit der Erhöhung der Auslastung die Produktivität, welches einerseits Fertigungskosten senkt oder andererseits eine stärkere Personalflexibilisierung erlaubt. Begleitende positive Effekte werden durch einen höheren Grad an Organisation und Standardisierung in Bezug auf die Senkung von Werkzeug- und Qualitätskosten erreicht. Diese stark unternehmensbezogenen Nutzenfaktoren werden im Folgekapitel verallgemeinert, mit den erkannten Potentialen verbunden und separat dargestellt.

7 Weiterführende Potentiale und Ausblick

Auf Basis der in Kapitel 6 beschriebenen Ergebnisse aus der Anwendung des Steuerungsmodells folgen hier die Ableitung des weiterführenden Forschungsbedarfes und die Beschreibung der identifizierten Potentiale. Durch die Verifikation im praktischen Umfeld und den spezifischen Erfahrungen kann der künftige Handlungsbedarf sowohl aus der wissenschaftlichen als auch der praxisbezogenen Betrachtungsweise abgeleitet werden.

7.1 Weiterentwicklung des Steuerungsmodells

In der Lenkungsebene des Steuerungsmodells besteht weiterer Handlungsbedarf in der Verbindung der Planungs- und Steuerungsprozesse. Künftig kann die höhere Transparenz, die durch das Steuerungsmodell erreicht wurde, nicht nur gegenwartsbezogen sondern vielmehr zukunftsbezogen durch die Produktionsplaner genutzt werden. Dazu sind der zeitliche Ablauf und die systemische Einbindung von Grob- und Feinplanung in Abstimmung mit der zentralen Schnittstelle zur Kapazitätsterminierung zu betrachten. Um das künftig in höhere Vorgabequalität umzusetzen zu können, ist die Weiterentwicklung und Detaillierung des Steuerungsmodells um die Abläufe in Auftragserzeugung, Kapazitätsterminierung und einer zwischen Planung und Steuerung abgestimmten Auftragsfreigabe notwendig.

Aus dem Ansatz zur Integration der verfahrenstechnischen Parameter in die Auftragsfreigabe entsteht der weiterführende Anspruch, dieses Konzeptelement im Steuerungsmodell detaillierter und über einen längeren Zeitraum anhand von Beispielen zu überprüfen. Der Ansatz zeigt **hohes künftiges Potential**, um die weiter oben beschriebene Auftragsplanung und -freigabe anhand von verfahrenstechnischen Auftrags-Paketen zu verbessern.

In der Ausführungsebene existieren bedingt durch die Funktionalitäten der Module verschiedene Weiterentwicklungspotentiale. Für alle Module zutreffend ist die Weiterentwicklung des organisatorischen Reifegrades, z. B. durch ein höheres Niveau an Ordnung und Sauberkeit und Vereinheitlichung von Materialtransport oder Arbeitsabläufen, durch die Überführung der wesentlichen Prozesse in einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess. Dazu müssen auch die Ansätze zur Standardisierung in der Werkstattfertigung weiterentwickelt werden. In der Zukunft kommen hier auch neue wissenschaftliche Ansätze ganzheitlicher Produktionssysteme für die Einzelteil- und Kleinserienfertigung zum Tragen, auf deren Basis Gedankengänge dieser Arbeit fortgesetzt werden können.

Die entwickelten und umgesetzten Konzeptelemente zur Digitalisierung und Vernetzung von Prozessen bilden die Grundlage für künftige Innovationen, die eine weiterführende wissenschaftliche Betrachtung rechtfertigen. Hier konnten die Effekte von **Echtzeit-**

Sensorik und hochauflösenden Produktionsdaten innerhalb der verfahrenstechnisch verketteten Werkstattsteuerung gezeigt werden, welches gleichzeitig eine Plattform für die weiterführende Vernetzung bildet. So zeigt z. B. ein bereits erfolgter Prototypeneinsatz von mobilen Endgeräten ersten Mehrwert auch für die Feinsteuerung. Ein weiteres Beispiel ist der Einsatz von **RFID-Agentensystemen** zur Weiterentwicklung des beschriebenen „**Single-Trolley-Flows**“ in der Werkstattsteuerung, um die Aufträge und Produktstammdaten mit dem System und den Maschinen weiter zu vernetzen. Im Rahmen von Folgearbeiten kann der Einsatz dieser heute in der Pilotphase befindlichen Vernetzungstechnologien bewertet werden. Hier entsteht das Potential die vernetzte, wertstromorientierte Produktionssteuerung in Zeiten von „Industrie 4.0“ noch kommunikationsfähiger zu machen und spezifische Entwicklungen anzustoßen.

7.2 Übertragbarkeit der vernetzten, wertstromorientierten Produktionssteuerung

Die Beherrschbarkeit von Komplexität mit einer gesteigerten Transparenz der verfahrenstechnisch geprägten Prozesskette steht im Mittelpunkt vieler Produktionsverantwortlicher. Die vorliegende Arbeit bietet dazu mit einem modularen Steuerungsmodell einen Beitrag, der weiterführend auf vergleichbare Fertigungsstrukturen adaptierbar ist.

Hersteller von komplexen Teilen aus Sinterwerkstoffen setzen branchenüblich vergleichbare Produktionssysteme ein. Die in der Ausgangssituation beschriebene Fertigungstechnik und -organisation unterscheidet sich oft im Detail, wobei die logistischen Herausforderungen in Planung und Steuerung häufig im gleichen Maße beschrieben werden. Während viele Aspekte und Methoden der schlanken Produktion bereits heute erfolgreich aus der Serienproduktion in die Einzel- und Kleinserienfertigung übernommen worden sind, ergeben sich etliche Herausforderungen bei der Übertragung eines übergeordneten Flussprinzips und der Pull-Orientierung an Schrittmacherprozessen (vgl. [ZIS12]). Mit den einzelnen Elementen aus dem Steuerungsmodell dieser Arbeit kann diese **ganzheitliche Betrachtungsweise erreicht** und die entsprechende Vorgehensweise dazu erklärt werden. Durch die Modulorientierung, die Beschreibung wesentlicher Konzeptelemente und die zahlreichen anwendungsorientierten Beispiele wichtiger Grundfunktionalitäten, können hier entwickelte Lösungsansätze daher auch **partiell auf andere Fertigungsstrukturen übertragen werden**.

Beispielsweise zeigen erste Reaktionen aus dem Branchenumfeld dieser Arbeit das konkrete Interesse von zwei weiteren Unternehmen, die an Teilansätzen des Steuerungsmodells interessiert sind, um es auf die Strukturen ihrer Werke zu adaptieren. Besonderes Potential zur Übertragung zeigt die erreichte Standardisierung im Werkstattfluss von Einzelaufträgen und die Transparenz der geschaffenen Schnittstellen auch außerhalb der betrachteten Branche wie beispielsweise im Werkzeugbau. Weiterer Forschungsbedarf

liegt folglich in der künftigen Modellanwendung in weiteren Unternehmen der Einzelteil- und Kleinserienproduktion, um die Allgemeingültigkeit und Übertragbarkeit dieser Konzeption vertieft zu bewerten.

7.3 Praxisbezogene Potentiale durch die Umsetzung

Die gewonnenen Erkenntnisse aus der Umsetzungsphase ermöglichen zusätzlich die qualitative Betrachtung der direkten und indirekten Potentiale in Beispielen. Insbesondere die weiter oben genannten Einflüsse auf die innerbetrieblichen Abläufe und die Transparenzsteigerung in der Produktionssteuerung zeigen ein sehr großes Potential. Die Tabelle 7-1 verschafft einen qualitativen Überblick über die Gewichtung der Potentiale und deren zugrunde liegender Effekte, die anhand der Umsetzungserfahrungen und der Entwicklung der Kennzahlen im Praxisbeispiel abgeschätzt wurden.

Neben der Verbesserung der logistischen Leistungsfähigkeit kann durch die vernetzte, wertstromorientierte Produktionssteuerung vor allem die Effizienz der Prozesse und die Effektivität von Entscheidungen in betrieblichen Abläufen verbessert werden. Die umfassende theoretische Untersuchung der verfahrenstechnisch vernetzten Werkstattfertigung, die Modellierung eines Idealkonzeptes und die schrittweise reale Umsetzung haben im Verlauf dieser Arbeit zusätzlich spezifische Erfahrungen geprägt, mit der sowohl bisherige als auch zukünftige Effekte benannt werden können. Das dazu ergänzend beschriebene Nutzenpotenzial konnte in Teilen in der Praxis bereits erreicht werden, insbesondere was Bestands- und Fertigungskosten betrifft. Beispielsweise konnten im Modul Hartbearbeitung, durch die genannte Senkung des Umlaufbestandes und Erhöhung der Produktivität, Kosten von einigen hundert tausend Euro eingespart werden. Erst anhand der hier erarbeiteten Maßnahmen zur Transparenzsteigerung können darüber hinaus weitere potentielle Effekte zur Kostensenkung erkannt werden.

Diese sind exemplarisch in Tabelle 7-1 benannt und motivieren inhaltlich weiterführende Themen, wie beispielsweise den Einbezug von Energiedaten in die Taktung des Moduls Sintern, in das Steuerungsmodell zu integrieren. Darin wird auch maßgeblich der künftige Entwicklungsbedarf erkannt. Es sollte dazu ein noch höherer Detaillierungsgrad und die ganzheitliche Anwendung der hier erarbeiteten Lösungsansätze betrachtet werden. Neben der Umsetzung der Theorie sind die Weiterentwicklung der spezifischen Erfahrungen der Mitarbeiter und der Reife der Ansätze in der Praxis von hoher Bedeutung, um alle Potentiale im betrieblichen Umfeld auch belegen zu können, damit eine vollständige Leistungsbilanz letztendlich aufgestellt werden kann.

Tabelle 7-1: Nutzen, Effekte und Potentiale der vollständigen Implementierung

Kosten	Effekte	Potentiale
Bestandskosten	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduzierung Modul-Bestände ▪ Vermeidung hoher Entkopplungsbestände ▪ Verlagerung von Umlaufbestand in Auftragsfreigabe-Bestand 	-30 bis -50 Prozent
Fertigungskosten	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verbesserung Auslastung, OEE ▪ Personalflexibilität (Kapazitätseinsatz pro Modul) ▪ Nivellierung von Kapazitäten ▪ Werkzeugkosten 	bis -25 Prozent
Energiekosten	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Integration Energiedaten und -verbrauch in der Ofen-Taktung 	bis -20 Prozent
Logistikkosten	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Regelkreise für Transport ▪ Standardisierung der Prozesse ▪ Vermeidung von Leerläufen 	-5 bis -10 Prozent
Komplexitätskosten	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vermeidung von Überwachung ▪ Zeitverwendung der Führungskräfte zur Prozessverbesserung ▪ Effektive Kommunikation ▪ Einsparung Auftragsjäger ▪ Reduktion Einzelprobleme ▪ Bereichsübergreifende Synchronisation bei Eilaufträgen 	bis zu - 20 Prozent
Qualitätskosten	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Echtzeit-gestützte Qualitätsregelkreise ▪ Sofortrückmeldung ▪ Qualitäts-Regelkommunikation ▪ Bessere Steuerung von Ausfallteilen 	bis zu -30 Prozent
Informations- beschaffungskosten	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Manuelle Steuerung und Datensammlung ▪ Einfache Regelkreise, Regelkommunikation ▪ Transparenz in mehreren Ebenen ▪ Bessere Visualisierungsmethoden 	bis zu -25 Prozent

8 Zusammenfassung

Kleinere verfahrenstechnisch spezialisierte Unternehmen müssen heute neben der bestehenden Technologiefokussierung die Effizienz und Geschwindigkeit der Auftragsfertigung verbessern. Die Produktionssteuerung steht dabei im Mittelpunkt des Spannungsfeldes. Diese Arbeit begegnet dem mit einem neuartigen Steuerungsmodell, welches die Wirkzusammenhänge wertstromorientierter Steuerung der komplexen heterogenen Auftragsfertigung von Sinterbauteilen ganzheitlich erklärt und verbessert.

Integrierte Modelle von Lenkungs- und Ausführungsebene, um die Wirkzusammenhänge dieses Steuerungsproblems zu verstehen und geeignete Verbesserungsansätze in mehreren Ebenen des Produktionssystems aufzuzeigen, existieren bisher nicht. Daraus entwickelt sich die Zielsetzung, die Materialflüsse und Arbeitsabläufe in der Produktion, den betrieblichen Informationsfluss unter Berücksichtigung der IT, die technologischen Gegebenheiten der Prozesskette, sowie die Integration der Mitarbeiter in die Produktionssteuerung ganzheitlich zu betrachten und Lösungsansätze aufzuzeigen.

In Kapitel 2 erfolgt zunächst die Betrachtung der relevanten Rahmenbedingungen innerhalb der Themenstellung. Dabei wird erkannt, dass es den verbreiteten zentralen Steuerungssystemen häufig an Prägnanz und Aktualität in den Steuerungsinformationen fehlt. Dies führt meist zu hoher Intransparenz innerhalb des kurzen Planungshorizontes der Auftragsfertigung. Die dabei entstehenden Defizite gleichen die Verantwortlichen durch intensive Steuerungsaktivitäten aus, die eine komplexe verfahrenstechnisch spezialisierte Prozesskette in übergreifende Turbulenzen versetzt, wodurch die logistische und wirtschaftliche Leistungsfähigkeit in hohem Maße eingeschränkt wird.

Der in Kapitel 3 daraufhin untersuchte Stand der Technik zeigt auf, dass die Prinzipien der Pull- und Flussorientierung auch in dieser industriespezifischen Auftragsfertigung eine wesentliche Grundlage darstellen können. Dazu werden die Methoden der Entkopplung und Synchronisierung sowie moderne Kommunikations- und IT-Werkzeuge, die heute meist in der Serienproduktion verbreitet sind, mit der komplexen Produktion von Sinterbauteilen in Verbindung gebracht und bewertet. Bekannte Verfahren der Reihenfolgenbildung oder Kapazitätssteuerung werden nachfolgend auf Verwendbarkeit in der verfahrenstechnisch verketteten Werkstattsteuerung analysiert. Eine wichtige Rolle spielen Ansätze zur Erreichung einer hohen Informationstransparenz und schneller Entscheidungswege, die es innerhalb der Modellentwicklung einzubeziehen gilt.

Die identifizierten Handlungsbedarfe aus der Sicht der wissenschaftlichen Theorie und der betrieblichen Praxis werden dazu in ein detailliertes Anforderungsprofil überführt. Daraufhin wird in Kapitel 4 die Ausgangshypothese formuliert, nach der sich ein sinnvoller Ansatz

der wertstromorientierten Produktionssteuerung durch methodische Zerlegung der komplexen Prozesskette, einer modulbasierten Ablaufstruktur und der Schaffung zentral vernetzter Schnittstellen orientiert.

Aus dieser Hypothese heraus gebildete Leitsätze werden in Form eines Lösungsansatzes weiterentwickelt und in die Grobkonzeption des Steuerungsmodells überführt. Ergebnis ist ein neuartiges hybrides Steuerungsmodell, das der prozessorientierten Modularisierung folgt, modular wirkende Konzeptelemente beschreibt, und erste Leitprinzipien zur Implementierung aufzeigt.

Eine anschließende Detaillierung der einzelnen Konzeptelemente bricht die Wirkmechanismen in Bezug auf die Zielgrößen und Teilaufgaben in der Produktionssteuerung herunter und führt die einzelnen Steuerungsgrößen in der vernetzten, wertstromorientierten Produktionssteuerung wieder zusammen. Dadurch stellt sich eine bereichsspezifische Optimierung und wertstromorientierte Vernetzung ein.

Die einleitend formulierten Forschungsfragen, lassen sich durch diese Konzeption und die in Kapitel 5 beschriebene Implementierung anhand von Beispielen beantworten:

- Die geforderte wertstromorientierte Ausrichtung der Produktionssteuerung lässt sich durch den Modularisierungsansatz und der Etablierung von zentralen und dezentralen Regelkreisen erreichen, die mit dem Ziel eines übergeordneten Pull-Systems über wenige Schnittstellen synchronisiert und bestandsorientiert gesteuert werden.
- Module nehmen unterschiedlich adaptierte Funktionalitäten war, wodurch die Prozesskette am Anfang gezielt harmonisiert, durch die verfahrenstechnische Chargenproduktion flexibel synchronisiert und am Ende durch eine flussorientierte Werkstattproduktion in ein übergeordnetes Pull-System überführt wird.
- In den Modulen kommen für Teilaufgaben bekannte Verfahren der Reihenfolgenbildung und Kapazitätssteuerung wie z. B. FCFS und Leitstand zum Einsatz.
- Materialflüsse und Arbeitsabläufe können darauf basierend in jedem Modul unter Berücksichtigung der technologischen Anforderungen strukturiert, und die hohen Dispositionsfreiheitsgrade im Shop-Floor weitgehend fixiert werden.
- Eine reale Steigerung der Transparenz wird durch das Zusammenwirken aus standardisierter Organisationsstruktur und kurzfristiger Handlungsflexibilität in der Ausführungsebene, und der Schaffung vorausschauender Koordination von Schnittstellen in der Lenkungsebene erreicht.
- Durch die abgegrenzt zugelassene vollständige verrichtungsorientierte Flexibilität, wird der Komplexität der prozesstechnischen Variation dezentral mit hohen Freiheitsgraden entgegnet. In der Praxis wird Ausgangskomplexität dadurch reduziert.
- Die Vernetzung dieser Regelkreise erlaubt dabei entsprechende Kontrolle der Zielgrößen und befähigt durch die Digitalisierung von Prozessen zur zielgerichteten Kommunikation.

- Planung und Steuerung müssen in einer vernetzten modulatorientierten Logik stärker inhaltlich und verantwortlich verbunden werden, um entstandene Schnittstellen zielgerichtet planen und steuern zu können.

Mit der Realisierung des weiter oben genannten Forschungszieles wird durch die Entwicklung eines neuen modellierten Produktionssteuerungskonzeptes und dessen praxisnahe Übertragung der Erkenntnisstand in Bezug auf Fertigungssteuerungsverfahren in der Produktionslogistik und Organisation von Produktionssystemen erweitert. Entsprechende Beispiele in umgesetzten und getesteten industriellen Modulanwendungen zeigen den hohen Mehrwert dieser Betrachtungsweise und innovative Weiterentwicklungsmöglichkeiten. Durch die partielle Übertragung in die reale betriebliche Praxis kann Kapitel 6 die hohe Relevanz dieses Lösungsansatzes zeigen. Anhand signifikanter **Verkürzungen von Durchlauf- und Wartezeiten** sowie verbesserter Auslastung und erheblichen Stabilisierungseffekten wird eine erhöhte Effizienz und Geschwindigkeit in der Prozesskette erreicht und die Funktionalität der wesentlichen Module belegt. Zudem sind die positiven Effekte einer hohen Materialflustransparenz in der Kopplung mit Visualisierung, struktureller Einschränkung und der verbesserten Informationsverfügbarkeit für die Mitarbeiter ersichtlich. Dies zeigt sich beispielsweise in einer deutlichen Reduzierung des Abstimmungsaufwandes, drastisch gefallenen manuellen Steuerungsaktionen, geringeren Suchzeiten und der engen Kopplung mit steuernden Mitarbeitern.

Diese Arbeit liefert durch Kombination einer modularen dezentralen Steuerung mit gezielter Funktionalität der Module und einer zentral vorausschauenden Schnittstellensteuerung einen wesentlichen Beitrag zur **Effizienz- und Geschwindigkeitssteigerung** der verfahrenstechnisch verketteten Werkstattsteuerung. Durch diese ganzheitliche Betrachtungsweise werden die Grundlagen im Produktionssystem z. B. zur deutlichen Erhöhung des Flussgrades, Bestandsentkopplung und -senkung, sowie der digitalen Vernetzung gelegt. Mit der Umsetzung wesentlicher Elemente in die Praxis, liefert diese Arbeit einen Beitrag zur Lösung einer konkreten industriellen Problemstellung und zeigt daraufhin gewonnene Erfahrungen und weiterführende Lösungsansätze auf.

Weiterer Handlungsbedarf besteht in der tiefgreifenden Integration der Planung und Steuerung, um Reaktionsgeschwindigkeit und Prognosegenauigkeit vorausschauend deutlich zu steigern. Die Weiterentwicklung des Steuerungsmodells besteht hauptsächlich darin, Planung und Steuerung im ganzheitlichen Produktionssystem zu verbinden und die gewonnene Transparenz in den Modulen weiter zu erhöhen, um die vollständigen Potentiale dieses Lösungsansatzes durch weitere Umsetzungsbeispiele nachzuweisen. Darüber hinaus werden künftig auch gegenwärtig noch eher forschungsbezogene Technologien der IT-Vernetzung industrialisiert. Dadurch entsteht weiterer anwendungsbezogener Forschungsbedarf beispielsweise in der Nutzung von RFID-Agentensystemen und Simulation in Kombination mit der vernetzten Werkstattsteuerung aus dieser Arbeit.

Literaturverzeichnis

- [ABE11] ABELE, E.; REINHART, G.:
Zukunft der Produktion. Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. Carl Hanser Fachbuchverlag, s.l., 2011.
- [ARN08] ARNOLD, D. et al. Hrsg.:
Handbuch Logistik. Springer-Verlag, Berlin, 2008.
- [ARN09] ARNOLD, D.; FURMANS, K.:
Materialfluss in Logistiksystemen. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [ARZ14] ARZBERGER, F.; RUSSNER, C.:
Keramische Werkstoffe. In (Spur, G. et al. Hrsg.): Handbuch Spanen. Carl Hanser Verlag, München, 2014; S. 1283–1299.
- [AUE11] AUERBACH, T. et al.:
Selbstoptimierende Produktionssysteme. In (Brecher, C. Hrsg.): Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011; S. 747–1057.
- [BAU14] BAUERNHANSL, T.; HOMPEL, M. ten; VOGEL-HEUSER, B. Hrsg.:
Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. Springer-Vieweg-Verlag, Wiesbaden, 2014.
- [BEC06] BECKER, H.:
Phänomen Toyota. Erfolgsfaktor Ethik. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006.
- [BEG05] BEGEMANN, C.:
Terminorientierte Kapazitätssteuerung in der Fertigung. Dissertation, Universität Hannover. PZH-Verlag, Hannover, 2005.
- [BLU13] BLUNCK, H.; WINDT, K.:
Komplexität schafft Spielraum für Selbststeuerung. In wt Werkstattstechnik online, 2013. Heft 2; S. 109–113.
- [BMBF15] Bundesministerium für Bildung und Forschung:
Industrie 4.0 Innovationen für die Produktion von morgen. Referat Forschung für Produktion, Dienstleistung und Arbeit. Berlin, 2015.
- [BÖG15] BÖGE, A.; BÖGE, W. Hrsg.:
Handbuch Maschinenbau. Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik. Springer-Vieweg-Verlag, Wiesbaden, 2015.

- [BOO15] BOOS, W. et al. Hrsg.:
Erfolgreich Planen im Werkzeugbau. RWTH Aachen Werkzeugmaschinenlabor, Aachen, 2015.
- [BOR09] BORNHÄUSER, M.:
Reifegradbasierte Werkstattsteuerung. Dissertation, Uni Stuttgart. Jost-Jetter Verlag, Heimsheim, 2009.
- [BRA09] BRACHT, U.; QUASDORFF, O.:
Ideenmanagement mit Lean Production aus der Perspektive der Industriemeister. Ergebnisse einer Umfrage. In Industrial Engineering, 2009. Heft 1; S. 18–23.
- [BRA11] BRACHT, U.; GECKLER, D.; WENZEL, S.:
Digitale Fabrik. Methoden und Praxisbeispiele. Springer-Verlag, Berlin, New York, 2011.
- [BRA13] BRACHT, U.; LUEDECKE, M.:
Entscheidungsunterstützung im Logistikmanagement. In wt Werkstattstechnik online, 2013. Heft 3; S. 169–176.
- [BRA15] BRACHT, U.; ARZBERGER, F.; SCHULENBURG, F.:
Neue Fertigungssteuerung in der Ingenieurkeramik. Digitalisierung, Transparenz und Wertstromorientierung für modulare Konfigurationen. In wt Werkstattstechnik online, 2015. Heft 3; S. 109–114.
- [BRÜ08] BRÜGGEMANN, H.; MÜLLER, P.:
Digitales Wertstromdesign. In (Rabe, M. Hrsg.): Advances in simulation for production and logistics applications. Tagungsband zur 13. Fachtagung, Berlin, 01. - 02. Oktober 2008. Fraunhofer IRB-Verl., Stuttgart, 2008; S. 576–583.
- [BUH12] BUHL, M.:
Nivellierung in der variantenreichen und auftragsbezogenen Kleinserienfertigung. Dissertation, TU Dortmund. Shaker-Verlag, Aachen, 2012.
- [BUL09] BULLINGER, H.-J. et al.:
Handbuch Unternehmensorganisation. Strategien, Planung, Umsetzung. Springer-Verlag, s.l., 2009.
- [DAN09] DANGELMAIER, W.:
Theorie der Produktionsplanung und -steuerung. Im Sommer keine Kirschenpralinen? Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [DEU11] DEUSE, J.; BOHNEN, F. Hrsg.:
Entwicklung einer systematischen Vorgehensweise zur Produktionsnive-

lierung der variantenreichen Kleinserienfertigung. IGF Forschungsvorhaben. TU Dortmund, 2011.

- [DEU14] Deutsche Gesellschaft für Materialkunde (DGM); Verband der Keramischen Industrie (VKI), Deutsche Keramische Gesellschaft (DKG) Hrsg.:
Zukunftspotentiale von Hochleistungskeramiken. Förster & Borries, 2014.
- [DIC15] DICKMANN, P. Hrsg.:
Schlanker Materialfluss. Mit Lean Production, Kanban und Innovationen. Springer-Verlag, Berlin, 2015.
- [DOM09] DOMBROWSKI, U. et al.:
Modernisierung kleiner und mittlerer Unternehmen. Ein ganzheitliches Konzept. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [DOM15] DOMBROWSKI, U. Hrsg.:
Ganzheitliche Produktionssysteme. Aktueller Stand und zukünftige Entwicklungen. Springer-Vieweg-Verlag, Berlin, 2015.
- [ENG15] ENGELHARDT, P. R.:
System für die RFID-gestützte situationsbasierte Produktionssteuerung in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage. Dissertation, Technische Universität München. Utz-Verlag, München, 2015.
- [ERL10] ERLACH, K.:
Wertstromdesign. Der Weg zur schlanken Fabrik. Springer, Berlin, 2010.
- [ERL13] ERLACH, K.:
Die Lean Toolbox - Werkzeuge für die schlanke Produktion. Seminar "Werkzeuge und Analysemethoden", Fraunhofer IPA, 2013.
- [EVE96] EVERSHEIM, W. Hrsg.:
Produktion und Management "Betriebshütte". Springer-Verlag, Berlin u.a., 1996.
- [EVE97] EVERSHEIM, W.:
Organisation in der Produktionstechnik 3. Arbeitsvorbereitung. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1997.
- [FUC13] FUCHS, S.:
Wertstromorientierte Auftragsfreigabe bei dynamischen Engpässen in der Produktion nach dem Werkstattprinzip. Dissertation, RWTH Aachen. Apprimus-Verl., Aachen, 2013.
- [GER05] GERAGHTY, J.; HEAVEY, C.:
A review and comparison of hybrid and pull-type production control strat-

- egies.** In OR spectrum quantitative approaches in management, 2005, 27. Heft 2/3; S. 435–457.
- [GER11] GERBERICH, T.:
Lean oder MES in der Automobilzulieferindustrie. Ein Vorgehensmodell zur fallspezifischen Auswahl. Dissertation, TU Chemnitz. Gabler Verlag / Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2011.
- [GRI12] GRINNINGER, J.:
Schlanke Produktionssteuerung zur Stabilisierung von Auftragsfolgen in der Automobilproduktion. Dissertation. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, München, 2012.
- [GRU10] GRUß, R.:
Schlanke Unikatfertigung. Gabler Verlag, s.l., 2010.
- [GRU15] GRUNDSTEIN, S. et al.:
Planorientierte autonome Fertigungssteuerung. Simulationsbasierte Untersuchung der Planeinhaltung und der logistischen Zielerreichung. In wt Werkstattstechnik online, 2015, 105. Heft 4; S. 220 ff.
- [GÜN06] GÜNTNER, W. A. et al.:
Planung von Produktionsprozessen und Materialflussteuerung. In (Lindemann, U.; Reichwald, R.; Zäh, M. F. Hrsg.): Individualisierte Produkte - Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006; S. 151–161.
- [GÜN14] GÜNTHER, H.-O.; TEMPELMEIER, H.:
Supply Chain und Operations Management. Books on Demand, Norderstedt, 2014.
- [HAC89] HACKSTEIN, R.:
Produktionsplanung und -steuerung (PPS). Ein Handbuch für die Betriebspraxis. VDI-Verl., Düsseldorf, 1989.
- [HÄF13] HÄFER, M.:
Optimierung eines Produktionsprozesses einer Produktfamilie der Hochleistungskeramik unter technischen und wirtschaftlichen Aspekten. Diplomarbeit, 2013.
- [HC 14] HC Starck Ceramics GmbH:
Produktübersicht des Geschäftsfeldes Engineering Parts.
www.hcstarck.com.

- [HIR00] HIRSCHBERG, A. G.:
Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung. Dissertation, Technische Universität München. Utz-Verlag, München, 2000.
- [HOF15] HOFFMANN, M.:
Hochleistungskeramiken für Energie und Mobilität, Dresden, 2015.
- [HOP04] HOPP, W. J.; SPEARMAN, M. L.:
To Pull or Not to Pull. What Is the Question? In Manufacturing & Service Operations Management, 2004, 6. Heft 2; S. 133–148.
- [HOP11] HOPP, W. J.; SPEARMAN, M. L.:
Factory physics. Waveland Press, Long Grove Ill., 2011.
- [HÜL07] HÜLSMANN, M.; WINDT, K. Hrsg.:
Understanding Autonomous Cooperation and Control in Logistics. The Impact of Autonomy on Management, Information, Communication and Material Flow. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [HÜL14] HÜLSENBERG, D.:
Keramik. Wie ein alter Werkstoff hochmodern wird. Springer-Vieweg-Verlag, Berlin, 2014.
- [JÄG00] JÄGER, M.:
Kennliniengestützte Parametereinstellung von PPS-Systemen. Dissertation, Universität Hannover, 2000.
- [KAG13] KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. Hrsg.:
Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. Stifterverband der Deutschen Wirtschaft, Frankfurt a. M., 2013.
- [KÄM97] KÄMPF, R.:
Ein Verfahren zur flexiblen Fertigungsführung eines Fertigungssystems für Kleinserien mit unterschiedlich autonomen Arbeitsstationen. Dissertation. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1997.
- [KIE11] KIENZLE, F.:
Fertigungssteuerung in der Musterfertigung von Systemlieferanten. IBF, Chemnitz, 2011.
- [KLE06] KLETTI, J. Hrsg.:
MES - Manufacturing Execution System. Moderne Informationstechnologie zur Prozessfähigkeit der Wertschöpfung. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2006.

- [KLE14] KLETTI, J.; SCHUMACHER, J.:
Die perfekte Produktion. Manufacturing Excellence durch Short Interval Technology (SIT). Springer-Vieweg-Verlag, Berlin, 2014.
- [KOL04] KOLLENBERG, W. Hrsg.:
Technische Keramik. Grundlagen, Werkstoffe, Verfahrenstechnik. Vulkan-Verl., Essen, 2004.
- [KRE15] KREIMEIER, D. et al.:
Die synchrone Produktion. Ansatz mit teilautonomer Produktionsplanung-/steuerung und humanzentrierter Entscheidungsunterstützung. In wt Werkstattstechnik online, 2015, 105. Heft 4; S. 204–208.
- [LAP14] LAPPE, D. et al.:
'Vernetzte Steuerung einer schlanken Intralogistik. In wt Werkstattstechnik online, 2014. Heft 3; S. 112–117.
- [LIE06] LIEBIG, H.:
Logischer Entwurf digitaler Systeme. Springer, Berlin, 2006.
- [LIK13] LIKER, J. K.; MEIER, D.:
Der Toyota Weg. Für jedes Unternehmen ; Praxisbuch. FinanzBuch Verl., München, 2013.
- [LIN06] LINDEMANN, U.; REICHWALD, R.; ZÄH, M.F. Hrsg.:
Individualisierte Produkte - Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006.
- [LÖD01] LÖDDING, H.:
Dezentrale Bestandsorientierte Fertigungsregelung. Dissertation Leibniz Universität Hannover. VDI-Verl., Düsseldorf, 2001.
- [LÖD08a] LÖDDING, H.:
Ein Modell der Fertigungssteuerung. Logistische Ziele systematisch erreichen. In (Nyhuis, P. Hrsg.): Beiträge zu einer Theorie der Logistik. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008a; S. 219–233.
- [LÖD08b] LÖDDING, H.:
Verfahren der Fertigungssteuerung. Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008b.
- [LOP05] LOPITZSCH, J. R.:
Segmentierte adaptive Fertigungssteuerung. PZH, Produktionstechn. Zentrum, Garbsen, 2005.

- [LUC01] LUCZAK, H.; EVERSHEIM, W. Hrsg.:
Produktionsplanung und -steuerung. Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. Springer, Berlin, 2001.
- [MEI12] MEIER, C.; SCHMIDT, C.; RUNGE, S.:
Auswahl und Einführung von ERP-/PPS-Systemen. In (Schuh, G.; Stich, V. Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung 1. Grundlagen der PPS. Springer, Berlin, 2012; S. 332–379.
- [MEI15] MEIßNER, J.; Maasem, C. Kropp, S.:
Voruntersuchung „Produktion am Standort Deutschland“. In (Projektträger Karlsruhe PTKA Hrsg.): Prosense. Hochauflösende Produktionssteuerung auf Basis kybernetischer Unterstützungssystem und intelligenter Sensorik. Ergebnisbericht BMBF-Verbundprojekt. Apprimus Verlag, Aachen, 2015; S. 15–22.
- [MER96] MERTENS, P.:
Funktionen und Phasen der Produktionsplanung und -steuerung. In (Eversheim, W. Hrsg.): Produktion und Management "Betriebshütte". Springer-Verlag, Berlin u.a., 1996; S. 1411–1459.
- [MÜL07] MÜLLER, S.:
Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen. Dissertation, TU München. Utz, 2007.
- [MÜL09] Müller, Egon, Riedel, Ralph, Kienzle, Florian:
Schlanke Fertigungssteuerung in der Werkstattfertigung. In PPS-Management, 2009, 2009. Heft 2; S. 13–16.
- [MUS13] MUSSBACH-WINTER, U.:
Wirkzusammenhänge zwischen Datenqualität und Erfüllung der betrieblichen PPS-Ziele, Hannover, 2013.
- [MÜT09] MÜTZBERG, B.; NYHUIS, P.:
Individual Configuration of Production Control to Suit Requirements. In International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering, 2009. Heft 11; S. 1374–1379.
- [NEU01] NEUHAUSEN, J.:
Methodik zur Gestaltung modularer Produktionssysteme für Unternehmen der Serienproduktion. Dissertation, RWTH Aachen, 2001.
- [NYH06] NYHUIS, P. et al.:
Konfiguration der Fertigungssteuerung. Grundlagen und Anwendung in ei-

ner Werkstattfertigung. In wt Werkstattstechnik online, 2006. Heft 4; S. 195–199.

[NYH08a] NYHUIS, P.:

Produktionskennlinien — Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten. In (Nyhuis, P. Hrsg.): Beiträge zu einer Theorie der Logistik. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008a.

[NYH08b] NYHUIS, P. Hrsg.:

Beiträge zu einer Theorie der Logistik. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008b.

[NYH09] NYHUIS, P.; WIENDAHL, H.-P.:

Fundamentals of Production Logistics. Theory, Tools and Applications. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009.

[NYH10a] NYHUIS, P.; KLEMKE, T.; WAGNER, C.:

Wandlungsfähigkeit – ein systemischer Ansatz. Wandlungsfähige Produktionssysteme. GITO-Verlag, Berlin, 2010a.

[NYH10b] NYHUIS, P.; MÜTZBERG, B.:

Konfiguration der Fertigungssteuerung. Berücksichtigung unternehmensspezifischer Anforderungen. In wt Werkstattstechnik online, 100 (2010). Heft 4; S. 285–290.

[NYH12] NYHUIS, P.; WIENDAHL, H.-P.:

Logistische Kennlinien. Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012.

[OEL00] OELTJENBRUNS, H.:

Organisation der Produktion nach dem Vorbild Toyotas. Analyse, Vorteile und detaillierte Voraussetzungen sowie die Vorgehensweise zur erfolgreichen Einführung am Beispiel eines globalen Automobilkonzerns. Dissertation, Technische Universität Clausthal. Shaker, Aachen, 2000.

[OST12] OSTGATHE, M.:

System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage. Dissertation, TUM. Herbert Utz Verlag, München, 2012.

[PAT12] PATZKE, R.; PATZKE, R.; DENGLE, B.:

Materialflussoptimierung mittels agentenbasiertem MES. Intelligente Analyse und Optimierung von Produktionssystemen. In wt Werkstattstechnik online, 2012, 2012. Heft 5; S. 253–256.

- [PAW14] PAWELLEK, G.:
Ganzheitliche Fabrikplanung. Grundlagen, Vorgehensweise, EDV-Unterstützung. Springer Vieweg, Berlin, 2014.
- [PET09] PETER, K.:
Bewertung und Optimierung der Effektivität von Lean Methoden in der Kleinserienproduktion. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Shaker; Wbk Inst. für Produktionstechnik, Aachen, Karlsruhe, 2009.
- [PRO15] Projektträger Karlsruhe PTKA Hrsg.:
Prosense. Hochauflösende Produktionssteuerung auf Basis kybernetischer Unterstützungssystem und intelligenter Sensorik. Ergebnisbericht BMBF-Verbundprojekt. Apprimus Verlag, Aachen, 2015.
- [REI06] REICHWALD, R. et al.:
Wirtschaftlichkeitsbetrachtung individualisierter Produkte. In (Lindemann, U.; Reichwald, R.; Zäh, M. F. Hrsg.): Individualisierte Produkte - Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006; S. 165–178.
- [REI13] REINHART, G.; ENGELHARDT, P.; OSTGATHE, M.:
Modular Configuration of an RFID-based Hybrid Control Architecture for a Situational Shop Floor Control. In Industrial and Systems Engineering Review, 2013, 2013. Heft 1; S. 31–39.
- [REU15] REUTER, C. et al.:
ProSense. Produktionssteuerung in Zeiten von Industrie 4.0. In wt Werkstattstechnik online, 2015. Heft 422-426.
- [RÖS06] RÖSLER, J.; BÄKER, M.; HARDERS, H. Hrsg.:
Mechanisches Verhalten der Werkstoffe. Mit 31 Tabellen und 34 Aufgaben und Lösungen. Teubner, Wiesbaden, 2006.
- [SAL07] SALMANG, H.; SCHOLZE, H.; TELLE, R.:
Keramik. Springer, Berlin, New York, 2007.
- [SCH01] SCHOLZ, R.; BECKMANN, M.; SCHULENBURG, F.:
Abfallbehandlung in thermischen Verfahren. Verbrennung, Vergasung, Pyrolyse, Verfahrens- und Anlagenkonzepte. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2001.
- [SCH03] SCHIRRMEISTER, E.; WARNKE, P.; DREHER, C.:
Untersuchung über die Zukunft der Produktion in Deutschland. Sekundäranalyse von Vorausschau-Studien für den europäischen Vergleich ; deutscher

Anteil des Eureka-Factory-Projekts Informan 2000+ ; Abschlussbericht. ISI, Karlsruhe, 2003.

- [SCH07] SCHAT, W.; WIETERS, K.-P.; KIEBACK, B.:
Pulvermetallurgie. Technologien und Werkstoffe. Springer-Verlag, s.l., 2007.
- [SCH08a] SCHONER, P.:
Operative Produktionsplanung in der verfahrenstechnischen Industrie. Dissertation, Universität Kassel. Kassel Univ. Press, Kassel, 2008a.
- [SCH08b] SCHOLZ-REITER, B. et al.:
Dynamik logistischer Systeme. In (Nyhuis, P. Hrsg.): Beiträge zu einer Theorie der Logistik. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008b; S. 109–138.
- [SCH10] SCHUH, G. et al.:
Wertstromorientierte Konfiguration der Produktionssteuerung mit Enterprise Dynamics. In (Zülch, G.; Stock, P. Hrsg.): Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. Integration aspects of simulation: equipment, organization and personnel Karlsruhe, 7. und 8. Oktober 2010. KIT Scientific Publ, Karlsruhe, 2010; S. 414–420.
- [SCH11] SCHÖNSLEBEN, P.:
Integrales Logistikmanagement. Operations und Supply Chain Management innerhalb des Unternehmens und unternehmensübergreifend. Springer-Verlag, Heidelberg, New York, 2011.
- [SCH12a] SCHUH, G.; STICH, V. Hrsg.:
Produktionsplanung und -steuerung 2. Evolution der PPS. Springer, Berlin, 2012a.
- [SCH12b] SCHUH, G.; STICH, V. Hrsg.:
Produktionsplanung und -steuerung 1. Grundlagen der PPS. Springer, Berlin, 2012b.
- [SCH12c] SCHOLZ-REITER, B.; HÖHNS, H.:
Selbststeuerung logistischer Prozesse mit Agentensystemen. In (Schuh, G.; Stich, V. Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung 1. Grundlagen der PPS. Springer, Berlin, 2012c.
- [SCH13a] SCHUH, G.; POTENTE, T.; HAUPTVOGEL, A.:
Cyber-physische Feinplanung. Hochauflösende Produktionssteuerung auf Basis kybernetischer Unterstützungssysteme. In wt Werkstattstechnik online, 2013a. Heft 4; S. 336–339.

- [SCH13b] SCHUH, G.; STICHT, V.:
Produktion am Standort Deutschland. Ergebnisse der Untersuchung 2013. In FIR Aachen, 2013b.
- [SCH14] SCHENK, M.; WIRTH, S.; MÜLLER, E.:
Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik. Springer Vieweg, Berlin, 2014.
- [SCH15] SCHUH, G. et al.:
Produktionsdaten als Enabler für Industrie 4.0. Gemeinsame Studie der produktionstechnischen Institute IFA, IPMT, Fraunhofer IWU und WZL. In wt Werkstattstechnik online, 2015, 105. Heft 4; S. 200–203.
- [SEI06] SEIBOLD, J.:
Hybride Fertigungssteuerung in der Großserienproduktion. Dissertation Universität Hannover. PZH-Verlag, Garbsen, 2006.
- [SPA13] SPATH, D. Hrsg.:
Produktionsarbeit der Zukunft - Industrie 4.0. [Studie]. Fraunhofer-Verl., Stuttgart, 2013.
- [SPU89] SPUR, G.; LINKE, K.:
Keramikbearbeitung. [Schleifen, Honen, Läppen, Abtragen]. Hanser, München, 1989.
- [STE14] STEPHAN, P. et al.:
Industrie 4.0 in der praktischen Anwendung. In (Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten; Vogel-Heuser, B. Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. Springer-Vieweg-Verlag, Wiesbaden, 2014; S. 57–82.
- [STÜ12] STÜRMANN, A.:
Montagesynchrone Auftragssteuerung. Dissertation, Universität Hannover. PZH Produktionstechn. Zentrum, Garbsen, 2012.
- [TAK08] TAKEDA, H.; MEYNERT, A.:
Das System der Mixed Production. Personal-Order-Prinzip für kundenorientierte Produktion. mi-Fachverl., München, 2008.
- [TAK09] TAKEDA, H.:
Das synchrone Produktionssystem. Just-in-time für das ganze Unternehmen. mi-Wirtschaftsbuch FinanzBuch-Verl., München, 2009.
- [TÜC11] TÜCKS, G.; FUCHS, S.; ORTLINGHAUS, P.:
Komplexität in der Fertigung beherrschen. In Complexity Management, 2011.

- [UHL15] UHLMANN, E.; SCHALLOCK, B.; OTTO, F.:
Intelligente Werkstattfertigung. Steuerung von Serienprodukten für die Werkstattfertigung mit Industrie 4.0-Lösungen. In wt Werkstattstechnik online, 2015, 105. Heft 4; S. 184–189.
- [ULR76] ULRICH, P.; HILL, W.:
Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. In Wirtschaftswissenschaftliches Studium Wist ; Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt, 1976, 5. Heft 7; S. 304–309.
- [ULR81] ULRICH, H.:
Die Betriebswirtschaftslehre als anwendungsorientierte Sozialwissenschaft. In Die Führung des Betriebes Curt Sandig zu seinem 80. Geburtstag gewidmet, 1981; S. 1–25.
- [VDI07] VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.:
Richtlinie 5600, Fertigungsmanagementsysteme, Manufacturing Execution System (MES). Beuth, Berlin, 2007.
- [VDI12] VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.:
Richtlinie 2870, Ganzheitliche Produktionssysteme. Methodenkatalog - Lean Production Systems. Beuth, Berlin, 2012.
- [VDI14] VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V. Hrsg.:
Werkstoffinnovationen für nachhaltige Mobilität und Energieversorgung. VDI-Gesellschaft Materials Engineering, 2014.
- [VIE01] Vieweg, H.-G.:
Der mittelständische Maschinenbau am Standort Deutschland. Chancen und Risiken im Zeitalter der Globalisierung und "New Economy". ifo Institut für Wirtschaftsforschung, München, 2001.
- [WAG13] WAGNER, R.; ARZBERGER, F.; RUSSNER, C.:
Si3N4 Components – Advanced Applications. In Ceramic Applications, 2013. Heft 1; S. 2–6.
- [WAN08] WANNENWETSCH, H. H.:
Wichtige Analysen und Instrumente in Produktion und Materialwirtschaft. In (Wannenwetsch, H. H. Hrsg.): Intensivtraining Produktion, Einkauf, Logistik und Dienstleistung. Mit Aufgaben und Lösungen. Gabler / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden, 2008; S. 24–39.
- [WAR93] WARNECKE, H.-J.:
Revolution der Unternehmenskultur. Das Fraktale Unternehmen. Springer, Berlin, Heidelberg, 1993.

- [WEI92] WEIDNER, D.:
Engpaßorientierte Fertigungssteuerung. Eine Untersuchung über die in optimized production technology implementierten Konzepte der Produktionsplanung und -steuerung. Dissertation, Universität Kiel. Lang, Frankfurt am Main, Berlin, 1992.
- [WES06] WESTKÄMPER, E.; DECKER, M.:
Einführung in die Organisation der Produktion. Springer, Berlin, 2006.
- [WES13] WESTKÄMPER, E. et al. Hrsg.:
Digitale Produktion. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [WIE02] WIENDAHL, H.-H.:
Situative Konfiguration des Auftragsmanagements im turbulenten Umfeld. Dissertation Universität Stuttgart. Jost-Jetter, Heimsheim, 2002.
- [WIE05] WIENDAHL, H.-P. et al.:
Human Factors in Production Planning and Control. In (Zülch, G.; Jagdev, H. S.; Stock, P. Hrsg.): Integrating Human Aspects in Production Management. IFIP TC5 / WG5.7 Proceedings of the International Conference on Human Aspects in Production Management 5-9 October 2003, Karlsruhe, Germany. International Federation for Information Processing, Boston, MA, 2005.
- [WIE12] WIENDAHL, H.-H.:
Auftragsmanagement der industriellen Produktion. Grundlagen, Konfiguration, Einführung. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2012.
- [WIE14a] WIENDAHL, H.-P.; REICHARDT, J.; NYHUIS, P.:
Handbuch Fabrikplanung. Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. Hanser, München, 2014a.
- [WIE14b] WIENDAHL, H.-P.:
Betriebsorganisation für Ingenieure. Hanser, München, 2014b.
- [WIE97] WIENDAHL, H.-P.:
Fertigungsregelung. Logistische Beherrschung von Fertigungsabläufen auf Basis des Trichtermodells. Hanser-Verlag, München, 1997.
- [WIE99] WIENDAHL, H.-P.:
Produktionsplanung und -steuerung: Aufgabenstellung und Zielkonflikte. In (Eversheim, W.; Schuh, G. Hrsg.): Betrieb von Produktionssystemen. Springer, Berlin, 1999; S. 14-1 bis 14-11.
- [WIL14] WILDEMAN, H.:
Modularisierung in Organisation, Produkten, Produktion und Service. TCW, Transfer-Zentrum, München, 2014.

- [WIL94] WILDEMAN, H.:
Fertigungsstrategien. Reorganisationskonzepte für eine schlanke Produktion und Zulieferung. TCW, Transfer-Centrum-Verl., München, 1994.
- [WIN08] WINDT, K.:
Ermittlung des angemessenen Selbststeuerungsgrades in der Logistik - Grenzen der Selbststeuerung. In (Nyhuis, P. Hrsg.): Beiträge zu einer Theorie der Logistik. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008; S. 349–372.
- [WOC14] WOCHINGER, T.:
Schlanke Auftragsbearbeitung durch eine durchgängige Planung und Steuerung. Auftragsabwicklungsprozesse "Lean" gestalten, Stuttgart, 2014.
- [WOM91] WOMACK, J. P.; JONES, D. T.; ROOS, D.:
The machine that changed the world. The story of lean production. Harper Perennial, New York, NY, 1991.
- [WUT10] WUTHNOW, A.:
**Steuerung und Nivellierung von Wertströmen in der Automobilsteuergerä-
tefertigung.** Dissertation, Technische Universität Dortmund. Shaker-Verlag,
Aachen, 2010.
- [ZAE12] ZAEH, M. F. et al.:
Adaptive Job Control in the Cognitive Factory. In (ElMaraghy, H. A.
Hrsg.): Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability.
Proceedings of the 4th International Conference on Changeable, Agile, Recon-
figurable and Virtual production (CARV2011), Montreal, Canada, 2-5 October
2011. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2012; S. 10–17.
- [ZIS12] ZISKOVEN, H.; LIEB, H.:
Produktivitätssteigerung durch eine Taktfertigung im Werkzeugbau. In
SchmiedeJOURNAL, 2012, 2012; S. 33–37.

Anhang A: Vertiefung der Grundlagen

A1: Werkstoffeigenschaften

Als Beispiel für die hohe Vielfalt der Anwendungsbereiche und Eigenschaften von Hochleistungskeramiken und Hartmetallen sind in Tabelle A-1 typische Eigenschaften dargestellt.

Tabelle A-1: Materialeigenschaften von Hochleistungskeramiken im Überblick (vgl. [ARZ14])

	StarCeram® S SiC	StarCeram® Si ¹⁾ SiC	StarCeram® Z ZrO ₂	StarCeram® Z-Al ZrO ₂	StarCeram® AT* 1201/1203 Al ₂ O ₃	StarCeram® A Al ₂ O ₃ 99,7%	StarCeram® N 7000 Si ₃ N ₄	StarCeram® N 3000 Si ₃ N ₄	StarCeram® N 8000 Si ₃ N ₄	StarCeram® N Grade E ¹⁾ Si ₃ N ₄
Dichte [g/cm ³]	3,10	3,05	6,00	6,00	3,35/3,32	3,90	3,22	3,23	3,23	3,90
Biegefestigkeit*** RT [MPa]	400	300	> 800	> 1.100	40/25	300	800	900	1.050	700
Weibullmodul RT [-]	> 10	> 10	> 10	> 10	40/60	> 10	> 15	> 15	> 15	> 15
Bruchzähigkeit** [MPa√m]	3,0	3,6	10	10	3-5	4,7	6,7	6,5	6,0	8,5
Härte (HV 10) [GPa]	25	20	12	12	5	20	15	15,2	15,2	14,0
E-Modul (RT) [GPa]	395	380	210	210	16/10	380	290	300	310	340
Wärmeleitfähigkeit (RT) [W/mK]	125	175	2	2	1,4	25	20	25	25	45
Wärmeausdehnungskoeffizient (RT-1000 °C) [x10 ⁻⁶ K ⁻¹]	4,5	4,0	10,8	10,8	1,4/1,0	7,8	3,4	3,4	3,4	6,0
Spez. elektr. Widerstand bei RT [Ωm]	10 ³ – 10 ⁴	10 ⁻²	10 ⁸ – 10 ¹³	10 ⁸ – 10 ¹³	10 ¹⁴	10 ¹²	10 ¹¹ – 10 ¹²	10 ¹¹ – 10 ¹²	10 ¹¹ – 10 ¹²	10 ⁻³
Thermoschockkoeffizient R1 [K]	180	190	280	350	1.500/2.000	80	620	670	760	280
Maximale Einsatztemperatur [°C]	1.600	1.350	800	800	1.300	1.500	1.000	1.200	1.200	900

* Porosität <= 10 %

** ICL-Methode

*** 4 Pkt-Biegung 40/20 mm

1) Elektrisch leitfähig, draht- und senkerodierbar

A2: Materialflussexplizitheit

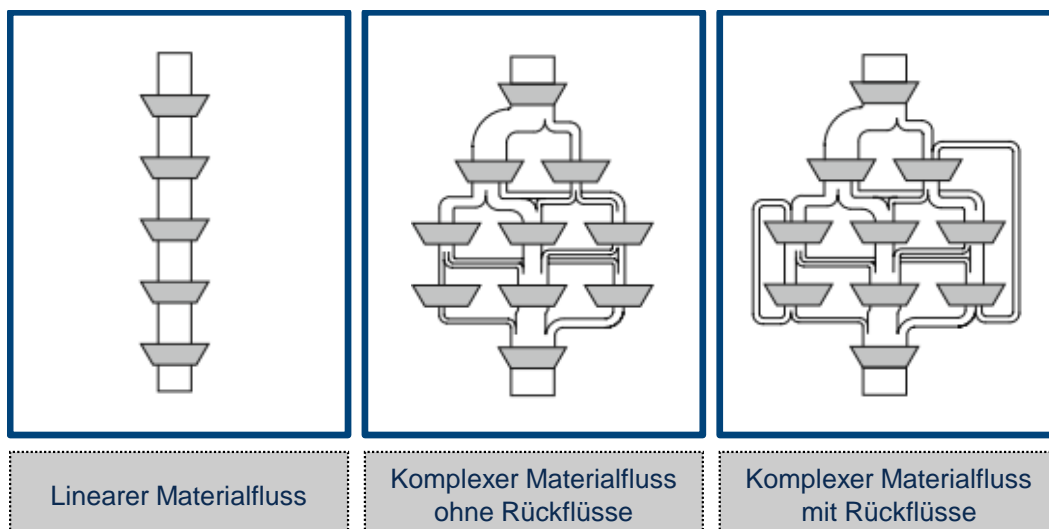


Abbildung A-0-1: Formen der Materialflussexplizitheit nach Lödging [LÖD08b, S. 105]

A2: Logistische Zielgrößen

Tabelle A-2: Detaillierung und Definition Logistische Zielgrößen

Zielgröße	Detaillierung	Literaturverweis
Bestand	Die Produktionssteuerung beeinflusst den Dispositions-, Umlauf- und Fertigbestand einer Produktion. In der Vergangenheit wurde vor allem der Sicherheitsaspekt von Beständen positiv bewertet, um lange Rüstzeiten und starre Kapazitätsmodelle abzubilden. Heute gelten Bestände als Verschwendungen in schlanken Produktionssystemen.	[WIE02, S. 105] [OEL00, S. 34ff.] [LÖD08b, S. 33]
Durchlaufzeit	Durchlaufzeit und Bestand sind eng miteinander verknüpft. Die Gesamtdurchlaufzeit eines Auftrages umfasst die Zeitspanne zwischen Bedarfsbestätigung (Auftragsbestätigung, etc.) und dem Zeitpunkt der Bedarfserfüllung (Auslieferung, Lagerzugang). Die Zeitspanne zwischen Auftragsfreigabe und Ablieferung der produzierten Materialien wird als Auftrags-Durchlaufzeit bezeichnet.	[WES06, S. 71] [WIE97, S. 36ff.] [WIE97, S. 56ff.] [LÖD08b, S. 52]
Termintreue	Auftragstermine sind die in der Praxis der Einzel- und Kleinserienfertigung am häufigsten benutzten Steuerungsgrößen in der Produktion.	[LÖD08b, S. 25] [WIE97, S. 3132f.]
Auslastung	Auslastung ist definiert als Verhältnis zwischen tatsächlicher und möglicher Leistung eines Systems.	[WIE97, S. 102] [BOR09, S. 45]

A3: Auftragsabwicklungsprozess

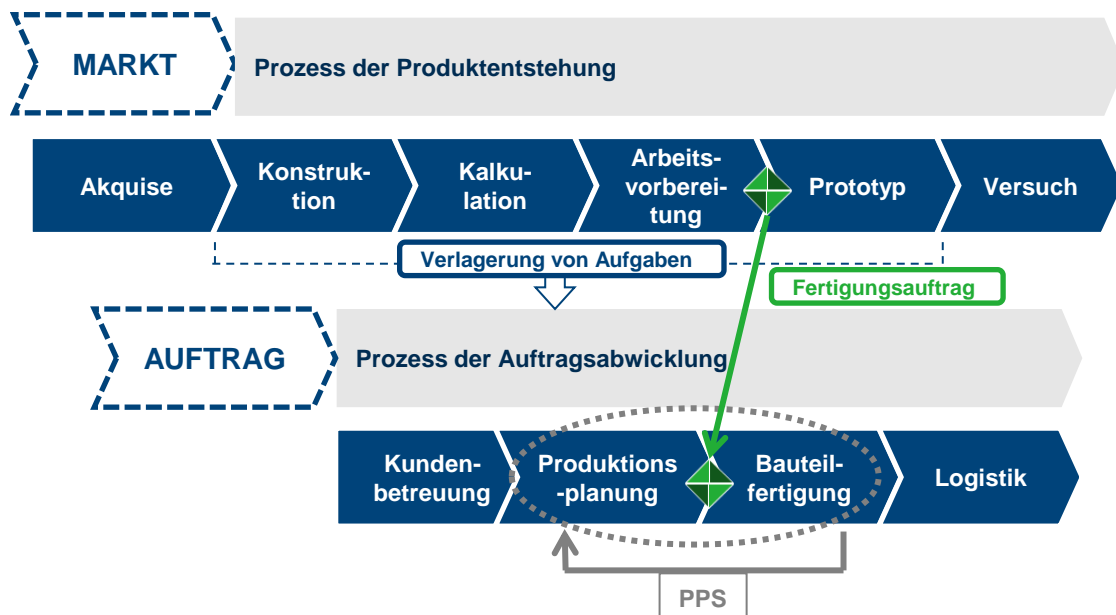


Abbildung A-0-2: Verlagerung der Produktentstehung in die Auftragsabwicklung (vgl. [BUL09])

Anhang B: Analytische Untersuchungen

B.1 Wertstromanalyse

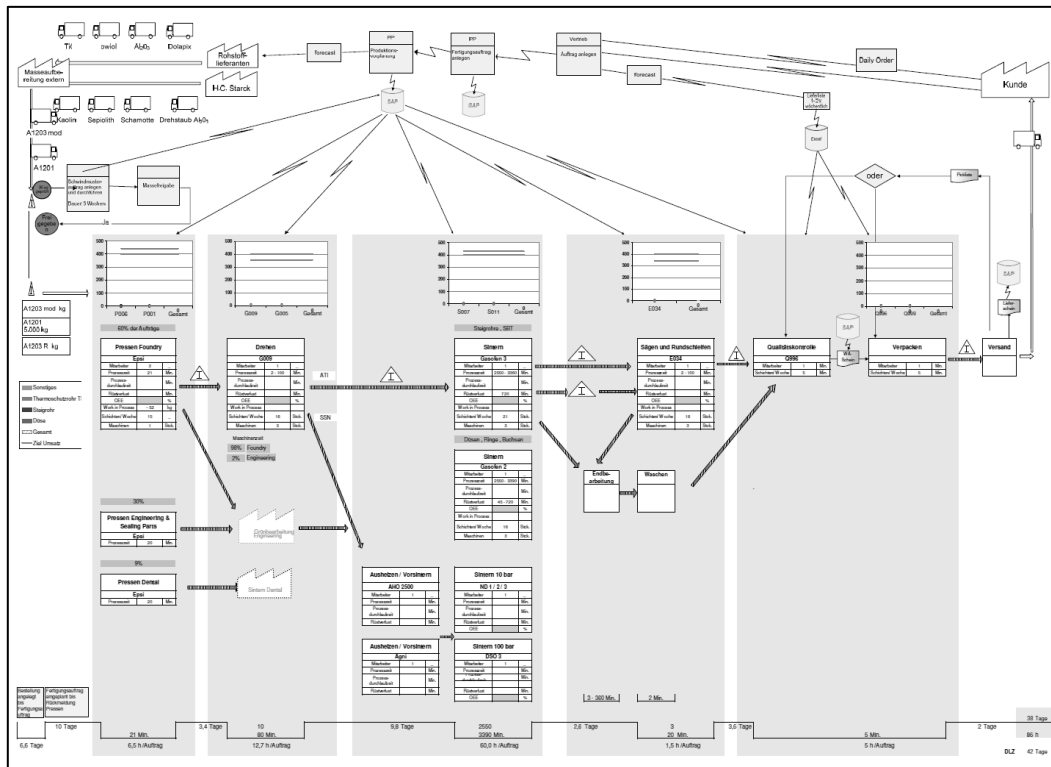


Abbildung B-0-1: Beispiel einer durchgeführten Wertstromanalyse in der Prozesskette

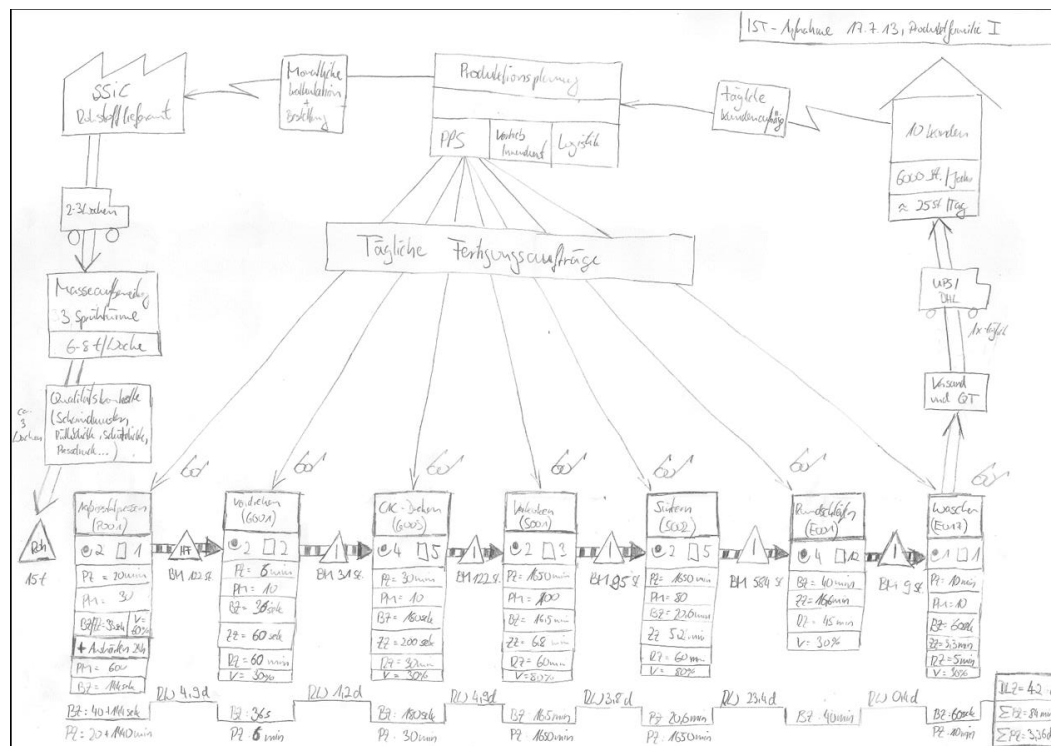


Abbildung B-0-2: „Vor-Ort“ Wertstromanalyse einer abgegrenzten Produktgruppe [HÄF13]

B.2 Analysebeispiele der Umfeldanalyse

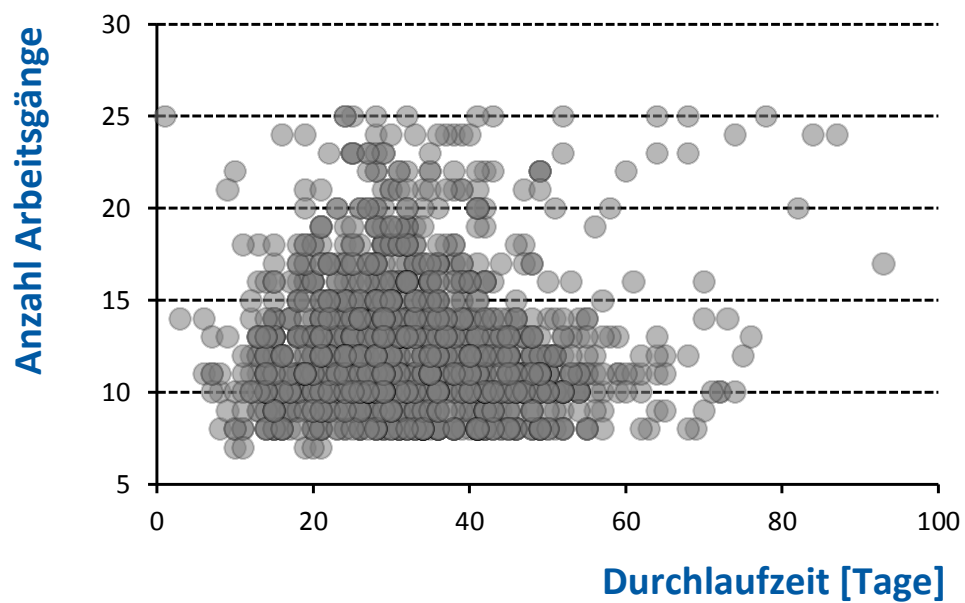
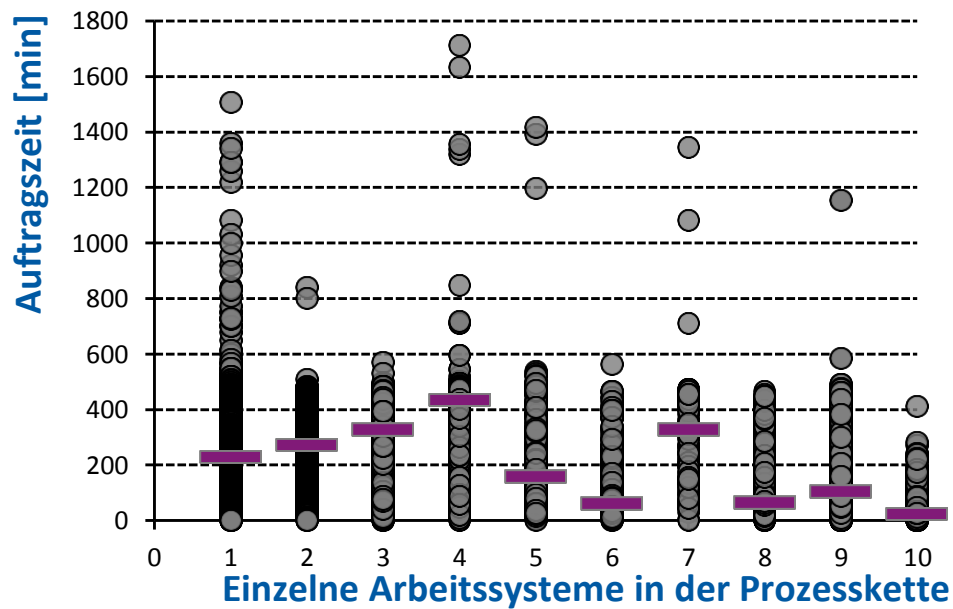


Abbildung B-0-3: Vergrößerung der Diagramme aus Abbildung 2-13

Anhang C: Beispiele der Visualisierung

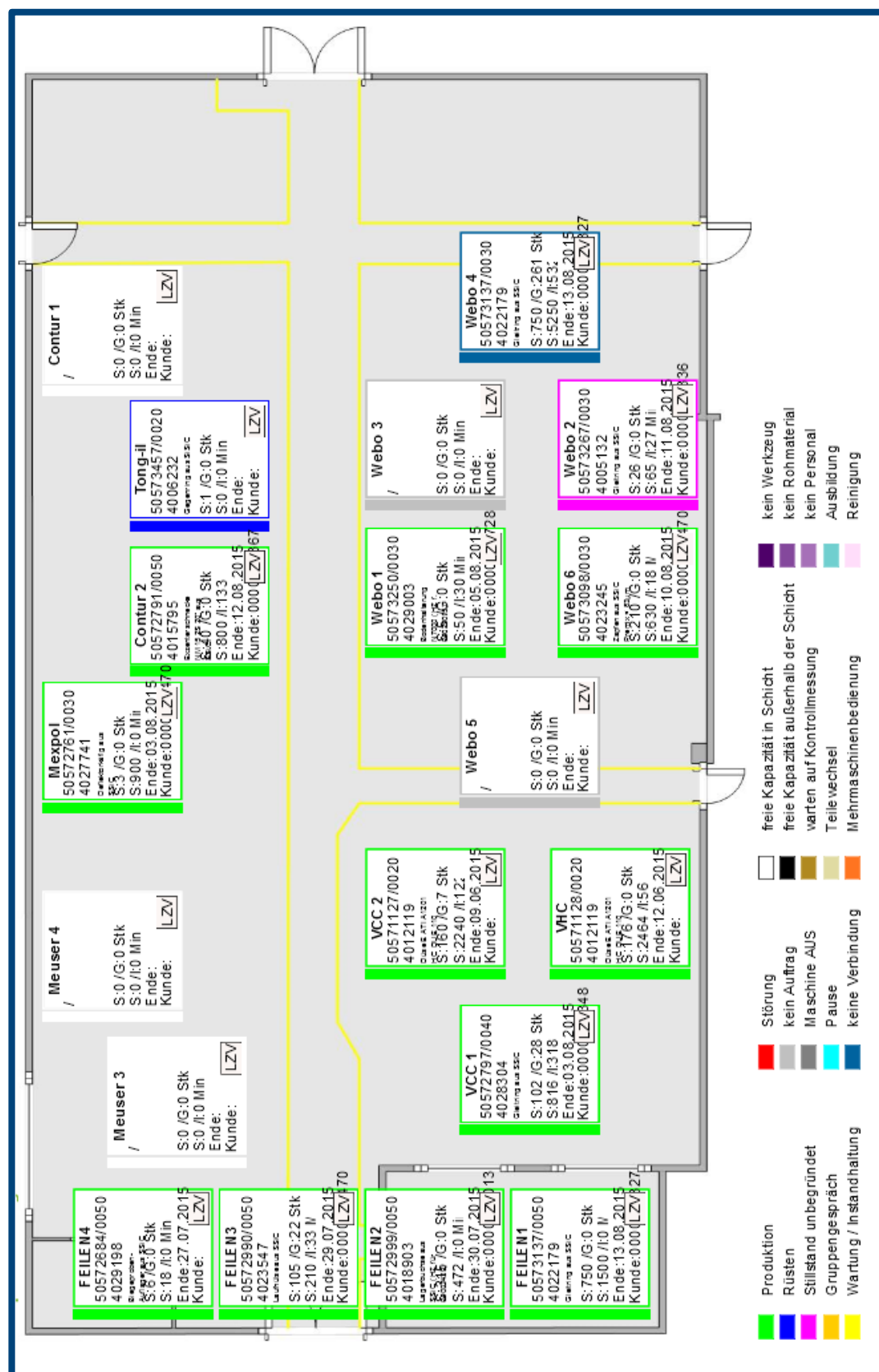


Abbildung C-0-1: Visualisierung der Maschinen- und Auftragszustände im Modul Grün-bearbeitung

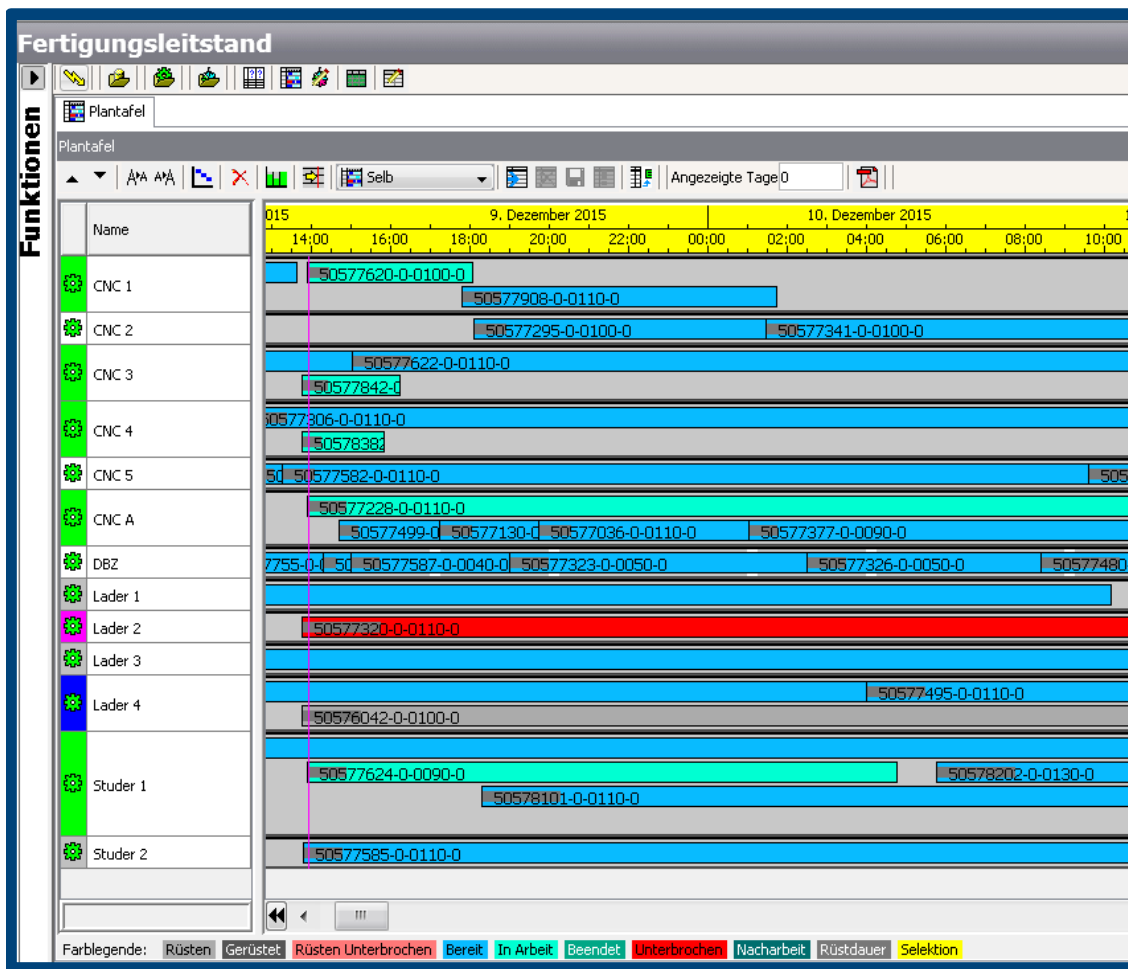


Abbildung C-0-2: Fertigungsleitstand zur Feinplanung/-steuerung Modul Hartbearbeitung

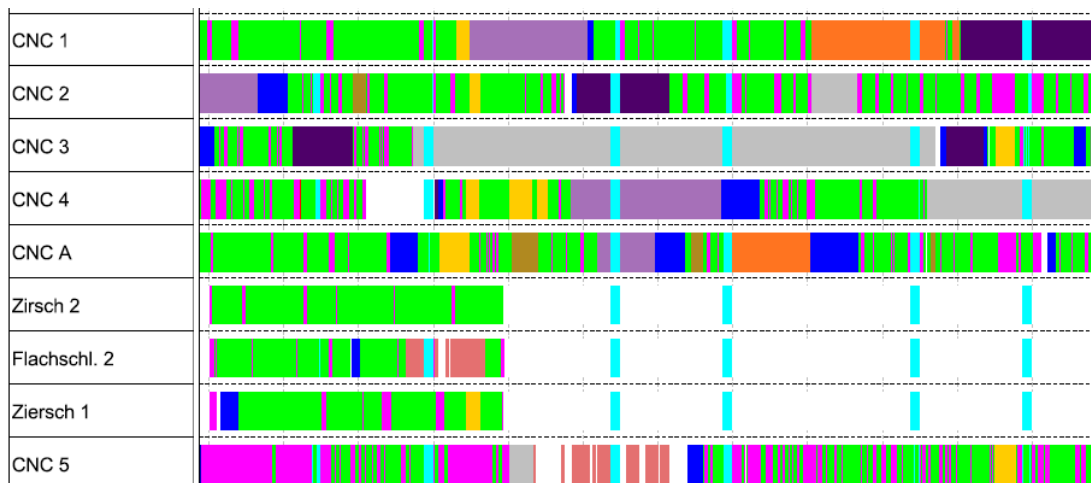
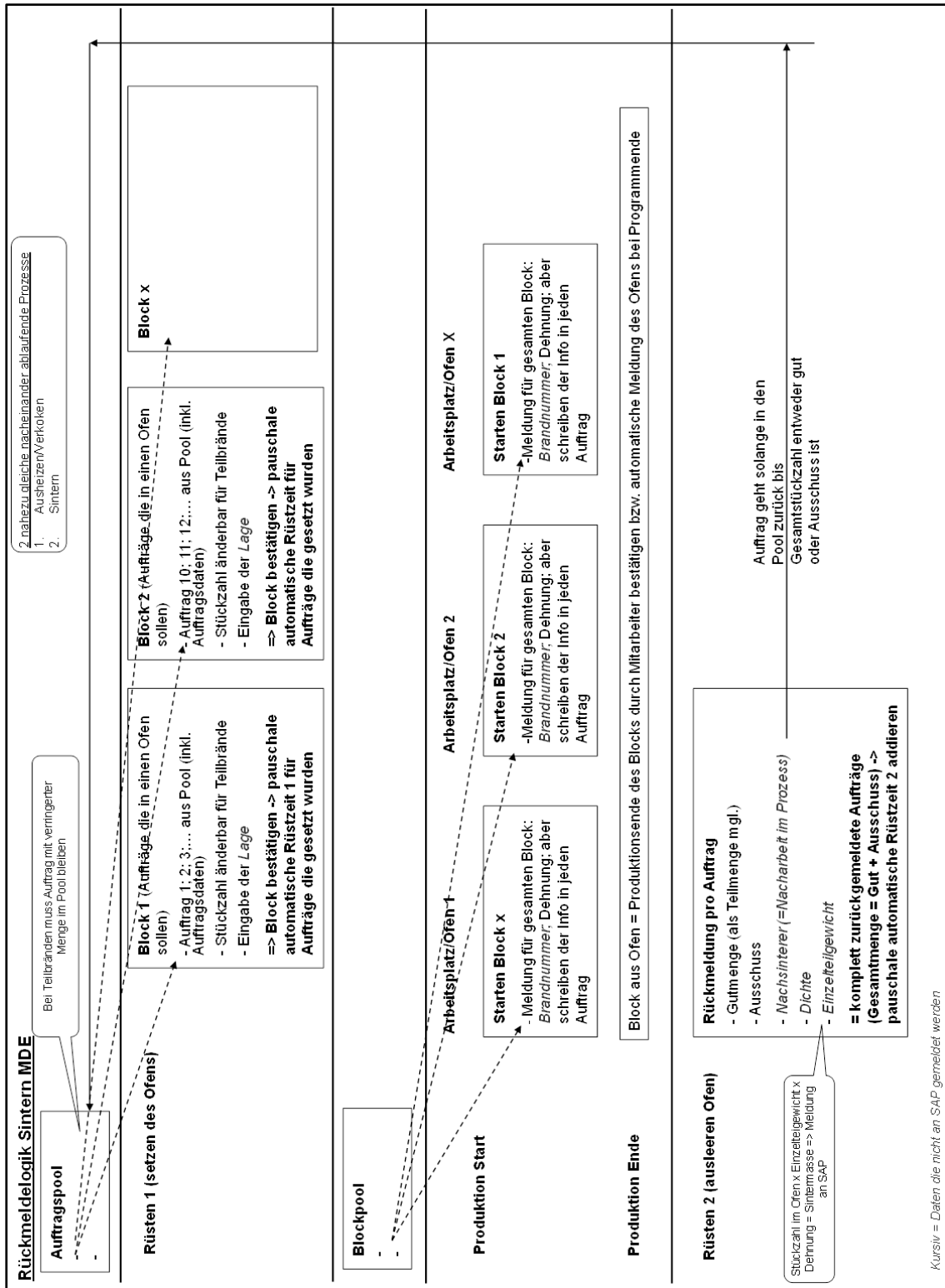
Abbildung C-0-3: Laufzeitprotokoll zur Echtzeit-Visualisierung von Maschinenzuständen
(Legende siehe Abbildung C-1)



Abbildung C-0-4: Regelmäßig automatisiert verteiltes Schicht-Cockpit für das Shop-Floor-Management

Anhang D: Ablaufstruktur im Modul Sintern



Anhang D: Weitere Umsetzungsbeispiele

Das nachfolgende Beispiel zeigt die Struktur im Modul Presserei. Ein nach den übertragenen Prinzipien der schlanken Produktion optimierter Arbeitsplatz ist exemplarisch in Abbildung C-1 dargestellt.

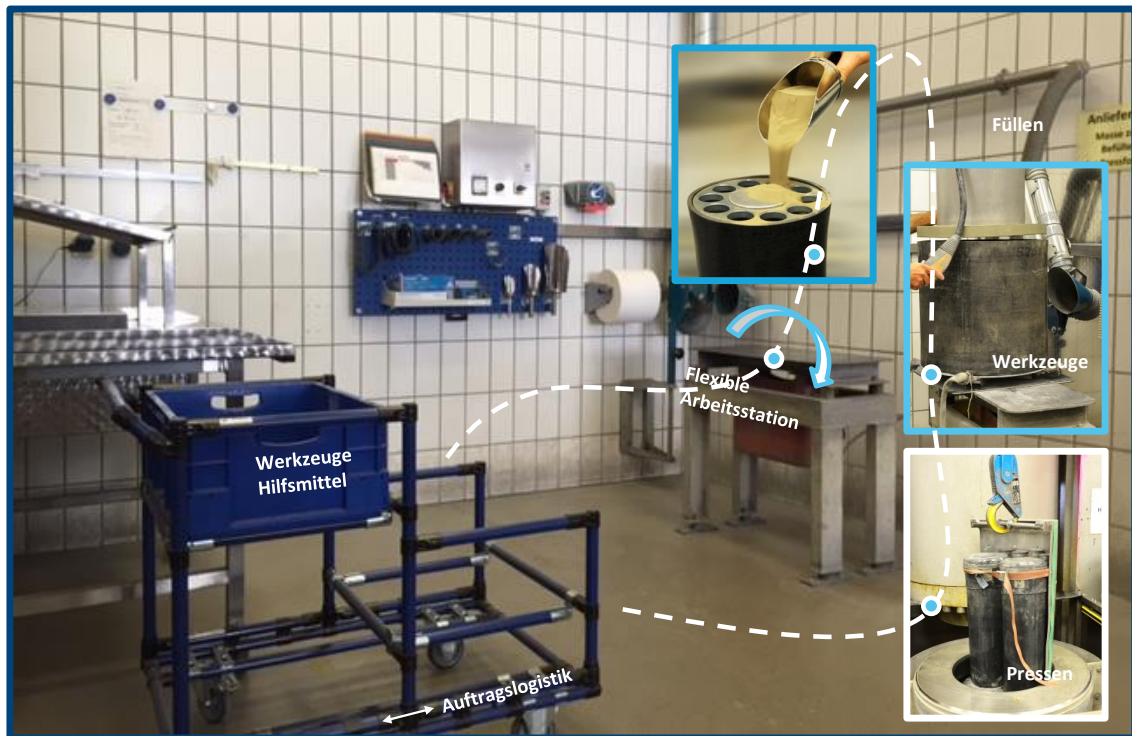


Abbildung D-0-1: Beispiel der Umsetzung von Abläufen der schlanken Produktion im Modul Presserei

Dieses Beispiel ist in Bezug auf die Produktionssteuerung von untergeordneter Bedeutung, zeigt jedoch ergänzend, dass Standardisierung und die Übertragung von Elementen der schlanken Produktion eine wichtige Grundlage darstellen.

Lebenslauf

PERSÖNLICHE INFORMATIONEN

Name Arzberger, Florian Klaus
Geburtsdatum 14. September 1984
Geburtsort Selb



HOCHSCHULAUSBILDUNG

seit 01/2013 **Promotionsstudium, Fachrichtung Maschinenbau**, Institut für maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit, Technische Universität Clausthal

05/2011 – 12/2012 **Qualifikationsstudium zur Promotion**, Technische Universität Clausthal

10/2003 – 03/2007 **Studium zum Diplom-Ingenieur, Fachrichtung Maschinenbau**, Fachhochschule Landshut, Bayern

09/2000 – 07/2002 **Fachhochschulreife**, Ausbildungsrichtung Technik, Fachoberschule Hof, Bayern

BERUFLICHE AUSBILDUNG

seit 06 / 2011 **H.C. Starck, Selb** Leiter des Bereiches Produktion der Division keramische Hochleistungskomponenten

01/2010 – 05/2011 **H.C. Starck, weltweit** Leiter Aufbau neue Geschäftsfelder und Referent des Divisionsleiters für strategische Projekte

06/2009 – 06/2011 **H.C. Starck, weltweit** Qualifikation für die Management-Laufbahn im Talent-Entwicklungs-Programm der H.C. Starck Gruppe mit weltweitem Einsatz.

11/2007 – 12/2009 **H.C. Starck, Selb** Leiter der Abteilung Anwendungstechnik und Technisches Marketing

05/2007 – 11/2007 **H.C. Starck, Selb** Entwicklungs- und Projektingenieur, Umsetzung von Neuprodukten in die Produktion